

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

CURSO DE AGRONOMIA

ACADÊMICO: EDUARDO PIRES BENDER

ORIENTADOR E SUPERVISOR:  
PROFESSOR PAUL RICHARD MOMSEN MILLER, PH.D.

# **Utilização da energia biotérmica da compostagem para o aquecimento de água e ar**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE AGRONOMIA

HABILITAÇÃO ENGENHEIRO AGRONOMO

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2009

ACADÊMICO: Eduardo Pires Bender

# **Utilização da energia biotérmica da compostagem para o aquecimento de água e ar**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em  
Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da  
Universidade Federal de Santa Catarina, como  
Requisito para a obtenção do título de  
Engenheiro Agrônomo.

PROFESSOR ORIENTADOR E SUPERVISOR: Paul Richard Momsen Miller

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2009.

# **Utilização da energia biotérmica da compostagem para o aquecimento de água e ar**

Por

**Eduardo Pires Bender**

Monografia aprovada como requisito para a obtenção do título de Engenheiro

Agrônomo pela Comissão formada por:

---

**Professor Paul Richard Momsen Miller**

Orientador e Supervisor

---

**Professor Fernando Bauer**

Banca Examinadora

---

**Engenheiro Agrônomo Gérson Koeing Jr.**

Banca Examinadora

---

**Engenheiro Agrônomo Bruno Bettarello**

Banca Examinadora

## **CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Título :** Utilização da energia biotérmica da compostagem para o aquecimento de água e ar.

**Estagiário:** Eduardo Pires Bender

**Matricula:** 04186524

**Curso:** Graduação em Agronomia

**Instituição:** Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Centro de Ciências Agrárias – CCA

**Local do estágio:** Laboratório de Biotecnologia Neolítica

**Periodo de estágio:** 31 de agosto de 2009 a 02 de novembro de 2009.

**Carga horária:** 400 horas

**Supervisor:** Prof. Paul Richard Momsen Miller

**Orientador:** Prof. Paul Richard Momsen Miller

## RESUMO

No presente trabalho realizado no Laboratório de Biotecnologia Neolítica do Centro de Ciências Agrárias da UFSC, o autor sob orientação e supervisão do Professor Paul Richard Momsen Miller, realizou um experimento com a finalidade de testar a viabilidade da energia biotérmica de um pequeno módulo de compostagem para o aquecimento de água e ar. Este pequeno módulo de compostagem foi construído dentro de uma caixa de madeira vazada para a circulação de ar e revestida com sombrite para evitar a queda de resíduos orgânicos, suas dimensões foram de 1,46 metros de comprimento, 0,90 metros de largura, 0,70 metros de altura e volume de aproximadamente 0,9m<sup>3</sup>. Foram realizadas medições regulares da temperatura interna do módulo, da temperatura de entrada e saída do ar nas tubulações em diferentes inclinações para verificar a possibilidade de acopla-las em bombas de calor melhorando sua eficiência e medições das temperaturas de entrada e saída da água após a passagem pelo trocador de calor disposto no interior da leira e da caixa d'água testemunha e então avaliar sua eficiência para o aquecimento de um reservatório externo. Para a verificação da eficiência da energia biotérmica gerada pela atividade biológica presente no processo de compostagem foram efetuados cálculos de área das circunferências, volume, perímetro, quantidades de calor transmitidos nos sistemas, vazão e velocidade da água e do ar para testar a viabilidade do aquecimento de água e ar propostos neste trabalho. A temperatura da compostagem apresentou-se na maior parte do tempo na fase termofílica possibilitando uma considerável geração de calor, sendo afetada principalmente por ventos do quadrante sul e com baixa umidade relativa, ocasionando perda de calor devido a queda na umidade interna do módulo de compostagem, o que comprometeu a atividade dos microorganismos termofílicos. O sistema de aquecimento de água utilizado mostrou-se viável, mesmo apresentando grandes quantidades de perda de calor entre as conexões hidráulicas de saída de água quente do trocador e manutenção da temperatura do reservatório com o ambiente, apresentando elevação de 24°C na temperatura da caixa d'água aquecida em comparação com a caixa d'água testemunha. O sistema de aquecimento de ar com a inclinação mínima de 25° aparentemente demonstrou-se viável para melhorar a eficiência de bombas de calor, pois houve um aumento significativo em sua temperatura após a passagem pela tubulação.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	5
INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO GERAL .....	12
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
3. JUSTIFICATIVA.....	13
4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
4.1 - Produção nacional de resíduos .....	14
4.2 - Compostagem termofílica .....	14
Figura 1: Curva padrão da variação da temperatura durante o processo de compostagem. Adaptado de KIEHL (2001). .....	15
Figura 2: Fluxo de ar nas leiras. Adaptado de: Inácio e Miller (2009) .....	16
4.3 - Microorganismos .....	18
4.4 - Umidade .....	19
4.5 - Relação Carbono / Nitrogênio .....	19
4.6 – pH .....	20
Figura 3 : Variação do pH durante a compostagem. Baseado em KIEHL (1985). .....	20
4.7 - Energia biotérmica .....	21
Figura 4: Evolução da temperatura da compostagem durante o experimento (BETTARELLO, 2007). .....	21
Figura 5: Elevação da temperatura da água nos reservatórios. BETTARELLO (2007). .....	22
Tabela 1: Temperatura máxima, mínima e média da água com e sem aquecimento, do composto e do ar (HERMES, 2003). .....	23
4.8 - Trocadores de calor .....	23
4.9 - Transmissão de calor em trocadores .....	24
4.10 - Transmissão de calor por convecção natural.....	24
4.11 - Bombas de calor .....	25
Figura 6: Ciclo de uma bomba de calor a compressão (SCHORR, 2007). .....	25

Figura 7: Relação entre potencia aplicada, obtida e temperatura ambiente (COTTAGE)...	26
5 - Material e Métodos .....	27
5.1 - Local de desenvolvimento do projeto .....	27
5.2 - Materiais utilizados na montagem da leira, na caixa de compostagem e nos sistemas de aquecimento de água e ar .....	27
5.3 - Montagem da caixa de compostagem .....	28
Figura 8: Dimensões do módulo de compostagem.....	28
5.4 - Montagem da leira na caixa de compostagem .....	28
Figura 9: Resíduos orgânicos e inoculante utilizados na compostagem. ....	29
Figura 10: Montagem da leira de compostagem .....	29
5.5 - Manutenção e reviradas da leira de compostagem.....	30
Figura 11: Revirada da leira na caixa de compostagem .....	30
5.6 - Sistema de aquecimento de ar .....	30
Figura 12: Cano com furos usado para no sistema de aquecimento de ar. ....	30
Figura 13: Pontos de entrada e saída de ar das tubulações. ....	31
5.7 - Sistema de aquecimento de água .....	31
Figura 14: Trocador de calor usado para o sistema de aquecimento de água. ....	31
Figura 15: Posição da caixa d'água e da saída da água quente do trocador para a caixa d'água em relação ao solo e da caixa testemunha. ....	32
5.8 - Coleta de dados e amostragem .....	33
Figura 16 : Pontos de medição de temperatura na superfície do pequeno módulo de compostagem. ....	33
Figura 17: Pontos de medição de temperaturas na entrada de ar, saída de ar e laterais. .	34
Figura 18: Termômetro Bimetal utilizado para coleta das temperaturas da leira e do sistema de aquecimento de ar.....	34
Figura 19: Medição da velocidade do ar através de fumaça. ....	35
Figura 20: Termômetro utilizado para medição da temperatura da água. ....	35
6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
6.1 - Temperatura do pequeno módulo de compostagem .....	36

Figura 22: Temperatura da leira em diferentes alturas durante os 40 dias do experimento, setas indicam os dias das reviradas. ....	37
Tabela 2: Temperatura máxima, mínima e média em diferentes alturas. ....	37
6.2 - Interações climáticas com o pequeno módulo de compostagem .....	38
Figura 23: Variação da temperatura da leira de acordo com a ação de ventos predominantes, as setas indicam quadrantes dos ventos predominantes. ....	39
Figura 24: Intensidade do vento durante o experimento. (EPAGRI – CIRAN, 2009). ....	39
Tabela 3: Velocidade e quadrante dos ventos mais intensos ocorridos durante o experimento (EPAGRI – CIRAN, 2009). ....	39
Figura 25: Evolução da temperatura média da leira de compostagem e precipitação pluviométrica durante o experimento. ....	40
Figura 26: Evolução da temperatura média da leira e relação a temperatura ambiente ...	40
6.3 - Temperatura do ar nas tubulações .....	42
Tabela 4: Temperatura do ar na saída de ar das tubulações em diferentes inclinações e temperatura média ambiente. ....	42
Figura 27: Perfil da temperatura do ar na saída de ar das tubulações em diferentes inclinações e em diferentes temperaturas internas da compostagem. ....	43
6.4 - Velocidade do ar nas tubulações em diferentes inclinações .....	43
Tabela 5: Velocidade do ar em diferentes inclinações. ....	44
Figura 28: Perfil da velocidade do ar em diferentes inclinações. ....	44
6.5 - Transmissão de Calor nas tubulações em diferentes inclinações .....	45
Tabela 6: Velocidade média, Vazão média e Quantidade de Calor média em diferentes inclinações. ....	45
Figura 29: Relação entre potencia aplicada, obtida e temperatura ambiente (COTTAGE). 46	
6.6 - Aquecimento de água.....	47
Figura 30: Temperatura da água na entrada de água fria, saída de água quente do trocador com inclinação de 31,34°, temperatura da caixa d'água testemunha e temperatura máxima da leira de compostagem. ....	47



Figura 31: Temperatura da água na entrada de água fria, saída de água quente do trocador com inclinação de 12,22°, temperatura da caixa d'água testemunha e temperatura máxima da leira de compostagem. ....	48
Tabela 7: Temperaturas entrada de água fria, saída da água quente no trocador de calor posicionado na inclinação de 31,34°, temperatura da caixa d'água testemunha e temperatura máxima da leira de compostagem durante o período de análise. ....	48
Tabela 8: Temperaturas de entrada de água fria, saída de água quente do trocador de calor posicionado inclinação de 12,22°, temperatura da caixa d'água testemunha e da compostagem durante o período de amostragem. ....	48
6.7 – Transmissão de calor entre a água e o trocador de calor em diferentes inclinações ....	49
Tabela 9: Áreas e Volumes das tubulações utilizadas para as conexões entre a caixa d'água e o trocador e dos componentes do trocador de calor. ....	49
Tabela 10: Tempo de circulação da água desde a saída até a volta para a caixa d'água. ....	49
Tabela 11: Quantidades de calor média nas diferentes inclinações do trocador de calor, em Joules/hora e KCal/hora. ....	50
Tabela 12: Velocidade e Vazão nas diferentes inclinações do trocador de calor em Metros/segundos e Litros/hora, respectivamente. ....	50
6.8 – Comparação entre o sistema de aquecimento de água em reservatórios internos e externos. ....	51
Figura 32: Evolução da temperatura da água dos reservatórios nos dois sistemas. ....	51
Figura 33: Evolução da temperatura da leira nos diferentes sistemas. ....	51
Tabela 13: Quantidade de calor trocada, Área de contato dos trocadores e Quantidade de calor por área de contato nos diferentes sistemas de aquecimento. ....	52
7. CUSTOS DO PROJETO .....	55
8. CONCLUSÕES .....	56
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	58
10. ANEXOS. ....	61
Anexo 1: Desenho esquemático do sistema hidráulico .....	61
Anexo 2: Folhas de cálculos. ....	61

## INTRODUÇÃO

Técnicas para o manejo de nossos recursos enfatizando a melhor destinação dos resíduos gerados pela sociedade devem ser utilizadas minimizando os efeitos da crise energética decorrente do esgotamento dos combustíveis fósseis tornando-nos mais eficientes e conscientes para a preservação das condições ideais para a vida na Terra (ODUM, 1988).

A prática do processo de compostagem tem como finalidade a produção de composto orgânico para a utilização na agricultura (KIEHL, 2001). O agrônomo inglês Howard (2007) realizou na Índia os primeiros estudos na década de 1920, demonstrando as qualidades da compostagem, desenvolvendo o processo Indore, maximizando a ciclagem de nutrientes provenientes de resíduos domiciliares, lixo e lodo de esgoto possibilitando uma melhor destinação para estes recursos.

Segundo Howard (2007) existe dois métodos de transformar resíduos orgânicos em húmus, um método é realizado em buracos, mas com o inconveniente de não poder ser efetuado em áreas com excesso de chuvas ou sujeitas a elevação dos níveis freáticos subterrâneos, e o outro método é conduzido em pilhas, neste sistema recomenda-se que as condições de drenagem sejam ideais e utilização de quebra-ventos melhorando as condições para a atividade biológica.

A decomposição natural de resíduos orgânicos pode ser realizada com ou sem a presença de oxigênio. No sistema anaeróbio, ou seja, sem oxigênio, as temperaturas são baixas, ocorre formação de gases com fortes odores como metano, ácido sulfídrico, além de ácidos orgânicos, mercaptanos e a matéria orgânica não atinge a completa estabilização (KIEHL, 1985).

No sistema aeróbio as temperaturas do processo são elevadas atingindo valores muito superiores aos 70°C. Para proporcionar melhores condições de saúde pública, a compostagem deve ser realizada neste sistema (KIEHL, 1985).

O processo de compostagem aeróbio é considerado adequado para o manejo de resíduos orgânicos, pois trata-se de um sistema flexível, de baixo custo, necessita de equipamentos simples, sanitariamente recomendado e requer mão-de-obra razoavelmente baixa. Os principais impactos gerados pela atividade como odores,

produção de chorume e atração e vetores são controlados se as leiras forem bem manejadas (BUTTENBENDER, 2004).

O processo de compostagem pode ser dividido em três etapas, a fase inicial do processo de decomposição é caracterizada pela fase criófila com temperaturas de até 35°C, a seguir com o aumento da atividade microbiana e temperaturas entre 35 - 45°C o processo passa para a fase mesófila, o auge de temperatura é alcançado na fase termófila com valores superiores a 70°C (KIEHL, 1985; KIEHL, 2001).

A temperatura ambiente em clima subtropical, aparentemente não interfere na temperatura do interior da leira de compostagem, que em média encontra-se próximo dos 60 graus Celsius, sendo esta atingida no quinto dia após a montagem da composteira. A manutenção dos teores de umidade ideais, intensa inoculação inicial com composto quente e utilização de tubulação de oxigenação na parte basal da leira são fundamentais para a rápida elevação da temperatura (BETTARELLO, 2007).

A energia biotérmica gerada pela atividade biológica dos microorganismos termófilos presentes no processo de compostagem aeróbia é considerada viável para o aquecimento de água (BETTARELLO, 2007; HERMES, 2003).

Este trabalho foi desenvolvido no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina no Laboratório de Biotecnologia Neolítica. O experimento tem como meta avaliar a eficiência da energia biotérmica da compostagem termofílica para o aquecimento de água e ar, diminuindo consumo de energia elétrica proveniente de hidrelétricas e termelétricas extremamente danosas ao ambiente.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Estudo do uso potencial da energia biotérmica da compostagem termofílica, para o aquecimento de água e ar, a partir de um pequeno módulo de compostagem.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Avaliar a temperatura interna de um pequeno módulo de compostagem.
- ii. Avaliar o aquecimento do ar nas tubulações dispostas no interior da leira de compostagem em diferentes inclinações.
- iii. Avaliar o aquecimento da água e a eficiência do trocador de calor.

### 3. JUSTIFICATIVA

Devido o preço atual dos combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, novas fontes de energia renováveis como a eólica, solar e biotérmica devem ser estimuladas para que os países consigam sua auto-suficiência e a adequação ao protocolo de Kyoto, minimizando os impactos das mudanças climáticas. (BID, 2006).

A reciclagem dos resíduos sólidos urbanos, associado ao processo de compostagem, deve ser considerada como uma excelente forma de recuperação energética, além de proporcionar vantagens econômicas, sociais e sanitárias. (MONTEIRO, 1985).

Para que se alcance a sustentabilidade recomenda-se o tratamento eficiente dos resíduos sólidos através da compostagem termofílica, pois este processo além de caracterizar-se fundamental para um desenvolvimento urbano sustentável minimiza impactos ambientais quando comparados ao tratamento dos resíduos em aterros sanitários. (INÁCIO, 1998).

O sistema de compostagem aeróbia é o mais utilizado e recomendado, pois possibilita uma maior atividade microbiana e um maior grau de estabilização da matéria orgânica (KIEHL, 2001).

Compostagem termofílica corresponde a um processo onde resíduos orgânicos são convertidos em húmus através da ação de microorganismos. Sua utilização na agricultura traz melhoria nas condições estruturais do solo, aumenta sua capacidade de absorção e retenção de água, redução de erosão e fornece nutrientes essenciais para o crescimento saudável das plantas. (MONTEIRO, 1985).

No sistema de compostagem aeróbia temperaturas de 60°C em média podem ser atingidas até o quinto dia após a montagem da leira, sendo que no decorrer do processo as temperaturas máximas podem ultrapassar os 70°C (BETTARELLO, 2007).

Temperaturas acima de 60°C asseguram a eliminação de qualquer tipo de patógenos ao homem e as plantas, sementes e ervas daninhas. (KIEHL, 1985).

## **4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 - Produção nacional de resíduos**

A produção de resíduos sólidos urbanos no Brasil, aproxima-se de 125.281 toneladas por dia, sendo 31,9% deste valor proveniente das 13 maiores cidades. A média de produção de resíduos domiciliares em uma população de até 200 mil varia entre 0,4 a 0,7 kg/hab/dia e para uma população acima de 200 mil pessoas encontra-se por volta e 0,8 a 1,2 kg/hab/dia (IBGE, 2000).

Aproximadamente 47,1% dos resíduos sólidos urbanos é destinado a aterros sanitários, 22,3% a aterros controlados e 30,5% a lixões. A compostagem é responsável pelo tratamento de apenas 0,4% dos resíduos gerados pelas populações urbanas (IBGE, 2000)

Nos municípios brasileiros, cerca de 15% de seu orçamento é gasto com o gerenciamento de resíduos sólidos, provocando ainda grande impacto ambiental além de poluição de água, ar e possibilitar o surgimento de efermidades para a população em geral. (CUNHA; CAIXETA FILHO, 2002).

A parte orgânica dos resíduos é responsável por cerca de 50% do volume dos resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários (INÁCIO, 1998). Buttenbender (2004) cita que a parte orgânica sempre corresponde a maior parte do total dos resíduos, no México (1997) 53,8% dos resíduos são orgânicos, no Uruguai os valores se aproximam de 56,72% e na Argentina (1994) 57,9%.

A reciclagem dos resíduos sólidos urbanos, associado ao processo de compostagem pode ser considerada como uma excelente forma de recuperação energética, além de proporcionar vantagens econômicas, sociais e sanitárias. (MONTEIRO, 1985).

Compostar a parte orgânica dos resíduos sólidos proporciona uma redução significativa dos custos de manutenção dos aterros sanitários, pois os rejeitos inorgânicos apresentam baixo peso e umidade além de aumentar significativamente os níveis de aproveitamento de todos tipos de resíduos (BUTTENBENDER, 2004).

### **4.2 - Compostagem termofílica**

A decomposição de resíduos orgânicos pode ser realizada por organismos que atuam com ou sem a presença de oxigênio, aeróbios e anaeróbios respectivamente. A

compostagem termofílica necessariamente consiste em um processo aeróbio e com elevação significativa na temperatura (KIEHL, 1985).

A atividade biológica e os fatores químicos e físicos estão diretamente ligados a produção de calor e elevação da temperatura da compostagem (MILLER, 1992).

O sistema de compostagem aeróbio é o mais utilizado e recomendado, pois possibilita uma maior atividade microbiana, um maior grau de estabilização da matéria orgânica em menor tempo (KIEHL, 2001). Além de proporcionar melhores condições estéticas e de saúde pública (KIEHL, 1985).

A compostagem aeróbia caracteriza-se por um rápido aquecimento da massa e elevada multiplicação da população microbiana (FIG. 1). A fase inicial é chamada de criófila, seguida pela mesófila e o auge da atividade microbiológica é caracterizado pela fase termófila atingindo temperaturas de até 75°C (KIEHL, 1985).

A medida que a disponibilidade de matéria orgânica assimilável pelos microorganismos diminui a temperatura decresce da fase termófila para as fases mesófila e criófila atingindo então a bioestabilização (KIEHL, 2001; KIEHL, 1985).

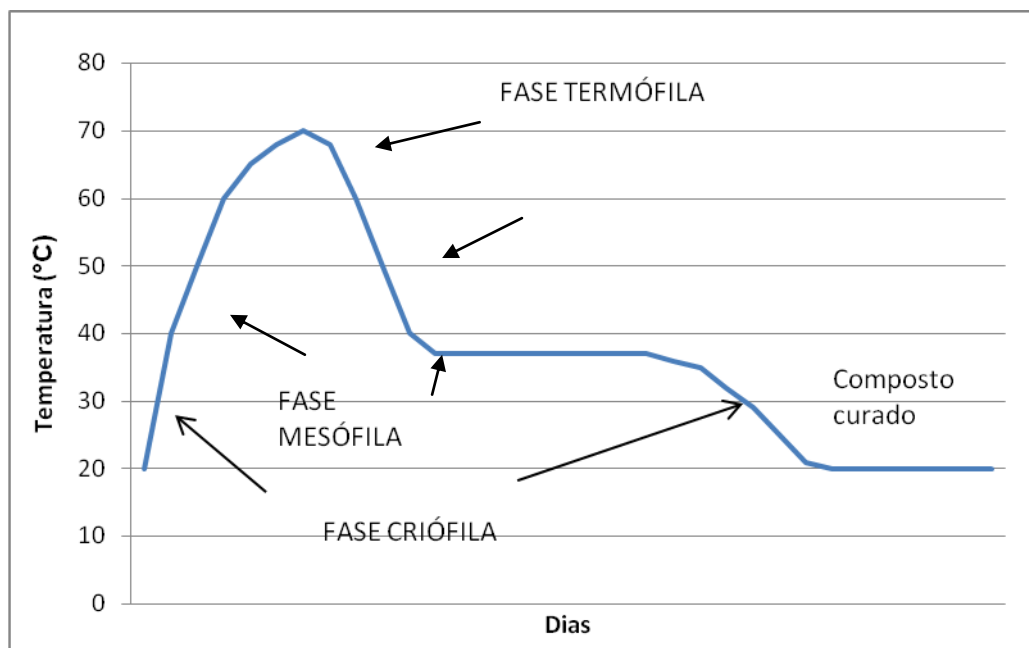


Figura 1: Curva padrão da variação da temperatura durante o processo de compostagem. Adaptado de KIEHL (2001).

O fluxo de ar nas pilhas de compostagem se dá das laterais para a superfície e a velocidade deste fluxo depende da porosidade do material a ser compostado e do tamanho da pilha (KIEHL, 1985).

Devido o fluxo de ar ocorrer no sentido das laterais para a superfície e o ar aquecido possuir menor densidade o calor gerado pela atividade microbiana tende a subir explicando a maior temperatura no topo da leira do que nas regiões mais próximas ao solo (FIG.2) (TEIXEIRA, 2009).

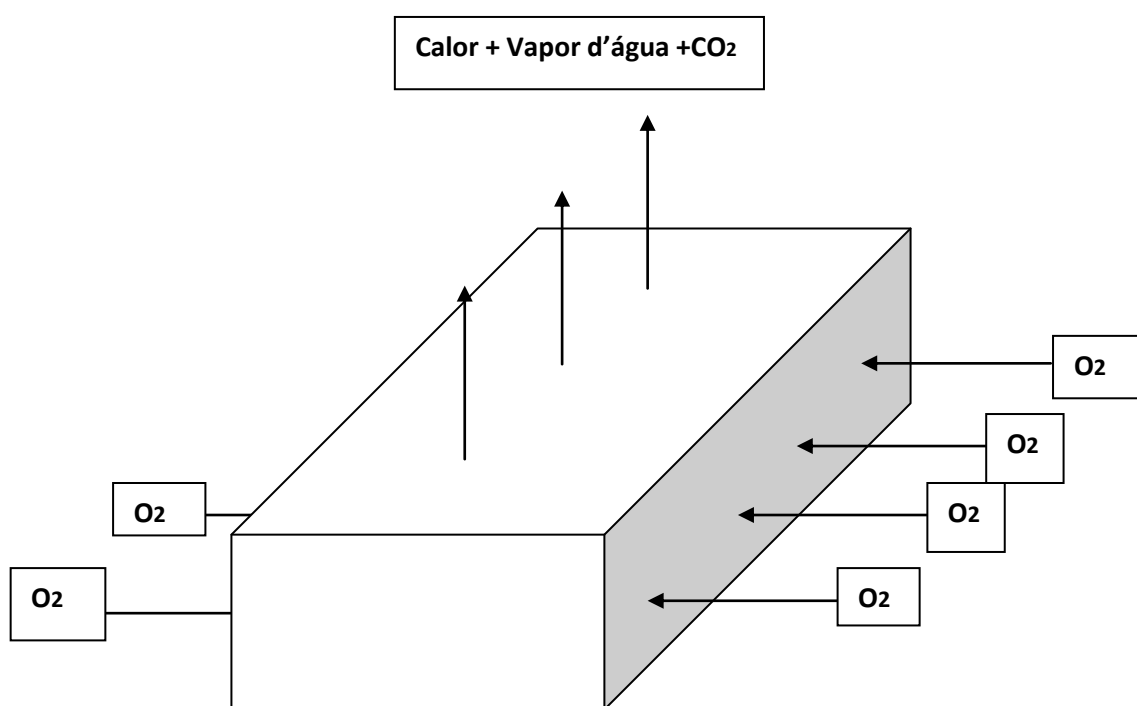


Figura 2: Fluxo de ar nas leiras. Adaptado de: Inácio e Miller (2009)

A principal forma de perda de calor da compostagem é a evaporação, sob condições de 60% de umidade relativa do ar, temperatura ambiente em torno dos 25°C, a temperatura da leira entre 50 - 70°C e umidade relativa do ar na saída da leira de 100%, a principal forma de perda de calor pela leira é a evaporação sendo responsável por cerca de 90% do total sendo que os 10% restantes é perdido para meio de forma direta (MILLER, 1992).



Fatores físicos, como o tamanho das partículas, podem interferir negativamente a atividade microbiana, caso o substrato seja muito denso a transmissão de calor na compostagem será afetada (MILLER, 1992).

Materias grosseiros e de consistência firme aumentam os níveis de aeração e melhoram o fornecimento de oxigênio para os microorganismos possibilitando uma maior atividade biológica e maiores temperaturas durante o processo (KIEHL, 1985; KIEHL, 2001).

Em leiras de compostagem de grande porte a temperatura pode alcançar de 40 a 50°C em dois ou três dias, sendo que, as temperaturas das partes externas são próximas as do ambiente, aumentando gradativamente até chegar ao auge da massa termofílica, onde não ocorre significativa influência do ambiente. A faixa de temperatura mais indicada para higienização do composto encontra-se entre 50 e 70°C. (KIEHL, 2001)

A faixa ideal de temperatura para a atividade microbiológica e para a eliminação de patógenos encontra-se próximo dos 55°C. Caso a temperatura não alcance valores entre 40 - 60°C até o quarto dia da implantação medidas de correção devem ser tomadas para que a atividade microbiana não diminua, aumentando o período de decomposição. (SILVA, *et al.*, 2001).

A temperatura ambiente em clima subtropical, aparentemente não interfere na temperatura do interior da leira de compostagem, que em média encontra-se próximo aos 60 graus Celsius, sendo esta atingida no quinto dia após a montagem da composteira (BETTARELLO, 2007). Segundo Kiehl (1985) ventos fortes e calor intenso podem provocar alterações na temperatura do composto.

Segundo Kiehl (1985), temperaturas acima de 60°C por cerca de 30 minutos asseguram a eliminação de patógenos como *Salmonella typhosa*, *Salmoella ssp*, *Escherichia coli*, dentre outros.

Em sistemas de compostagem com aeração e leiras com configuração adequada a atividade termofílica é mantida durante um longo período de tempo sendo importantíssimo para a obtenção de um composto orgânico de qualidade e livre de patógenos (BUTTENBENDER, 2004).

### 4.3 - Microorganismos

No processo de decomposição aeróbia os microorganismos predominantes são fungos, bactérias e actinomicetos, sendo que, sua intensidade e variedade, dependem da fase em que se encontra o processo (KIEHL, 1985; KIEHL, 2001).

A elevação natural da temperatura na massa é o fator principal para a seleção da flora microbiana presente no processo, as pilhas de composto bem arejadas devem alcançar temperaturas próximas a 75°C. Bactérias termófilas formadoras de esporos desenvolvem-se em temperaturas superiores a 70°C (KIEHL, 1985).

Em pilhas bem arejadas os microorganismos decompositores se desenvolvem bem por toda a massa, sendo que, no início do processo predominam as bactérias mesófilas e com a elevação da temperatura predominam as bactérias termófilas (KIEHL, 1985).

Os principais produtos decompostos por bactérias termófilas são açúcares, amidos, proteínas, e outros compostos de rápida digestão, enquanto fungos e actinomicetos que são menos exigentes em umidade e então mais presentes nas camadas mais ressecadas da massa atuam na decomposição da celulose e outros compostos mais resistentes (KIEHL, 1985).

As bactérias são os microorganismos encontrados em maior quantidade durante o processo, sendo encontradas em grande número tanto na fase mesófila como termófila, são responsáveis por cerca de 90% dos processos de degradação. Bactérias mesófilas são responsáveis pela decomposição dos compostos de estrutura mais simples começando a produção de calor e iniciando o crescimento das bactérias termófilas (FERNÁNDEZ, 2008).

Os actinomicetos possuem a capacidade de degradar compostos mais complexos e são importantes na eliminação de patógenos presentes na compostagem. Fungos encontram-se em menor quantidade do que bactérias e actinomicetos, mas no entanto possuem maior massa (FERNÁNDEZ, 2008).

Para aumentar a atividade microbiana, diminuir a perda de umidade, aumentar a temperatura e o consumo de oxigênio, facilitar o desprendimento do gás carbônico, recomenda-se realizar a inoculação com composto orgânico. (KIEHL, 2001).

#### **4.4 - Umidade**

Fatores como, manutenção dos teores ideais de umidade, intensa inoculação inicial com composto quente e utilização de tubulação de oxigenação na parte basal da leira são fundamentais para a rápida elevação da temperatura (BETTARELLO , 2007).

O teor de umidade ideal para a compostagem aeróbia encontra-se entre 40-60%, pois com quantidades muito baixas de umidade a atividade microbiana diminui podendo até ser interrompida e acima de 60% o ambiente pode tornar-se anaeróbio. (KIEHL , 2001).

A manutenção das condições ideais de umidade é de fundamental importância para a manutenção das atividades fisiológicas dos microorganismos e para a continuidade da atividade termófila (KIEHL, 1985).

As condições ideais de umidade permitem que ocorram trocas gasosas, transporte de produtos decompostos e que a temperatura se mantenha elevada (FERNÁNDEZ, 2008).

Em caso de excesso de água recomenda-se a utilização de materiais mais grosseiros como palhas, cascas e colmos picados, conseqüentemente aumentando a aeração da composteira. Se o problema for a baixa umidade deve-se fazer a aplicação de água no momento do manejo da pilha de compostagem (KIEHL, 2001).

#### **4.5 - Relação Carbono / Nitrogênio**

Este parâmetro é de fundamental importância para que se obtenha um produto final de qualidade sem causar danos ambientais. O carbono é utilizado com fonte energética e o nitrogênio nos processos de síntese protéica, então preconiza-se o equilíbrio entre estes elementos para que não se tornem um fator limitante para os microorganismos decompositores. (SILVA et al., 2001).

Bactérias e actinomicetos possuem em sua estrutura uma relação C:N de cerca de 5:1 e os fungos cerca de 10:1, o que possibilita uma distribuição distinta dos microorganismos na leira. (MILLER, 1992).

A relação entre carbono e nitrogênio ideal para a compostagem esta em torno de 30/1, pois os microorganismos que utilizam o carbono orgânico como fonte de energia

consomem 33% deste carbono tornando-o constituinte do produto final do processo e 66% após esta síntese é liberada na forma de CO<sub>2</sub>. O composto encontra-se na forma de húmus quando sua relação C/N está próxima a 17/1 (KIEHL, 2001).

A compostagem não necessita de inoculação com esterco para a manutenção ideal da relação C/N na decomposição de resíduos orgânicos domiciliares (LOUREIRO, 2007).

#### 4.6 – pH

O pH durante o processo de compostagem está diretamente ligado a atividade biológica presente no processo, no início devido a liberação de ácidos orgânicos o pH torna-se ácido, durante a fase termófila com a produção de amoníaco o ambiente se neutraliza e o pH pode chegar a 8,5 e quando o composto encontra-se curado o pH estabiliza-se entre 7,0 e 8,0 (FERNÁNDEZ, 2008).

Níveis de pH em torno de 7,0 a 8,0 são considerados benéficos, pois podem ser usados para a correção de solos ácidos. (PEREIRA NETO, 1996 citado por BUTTENBENDER, 2004)

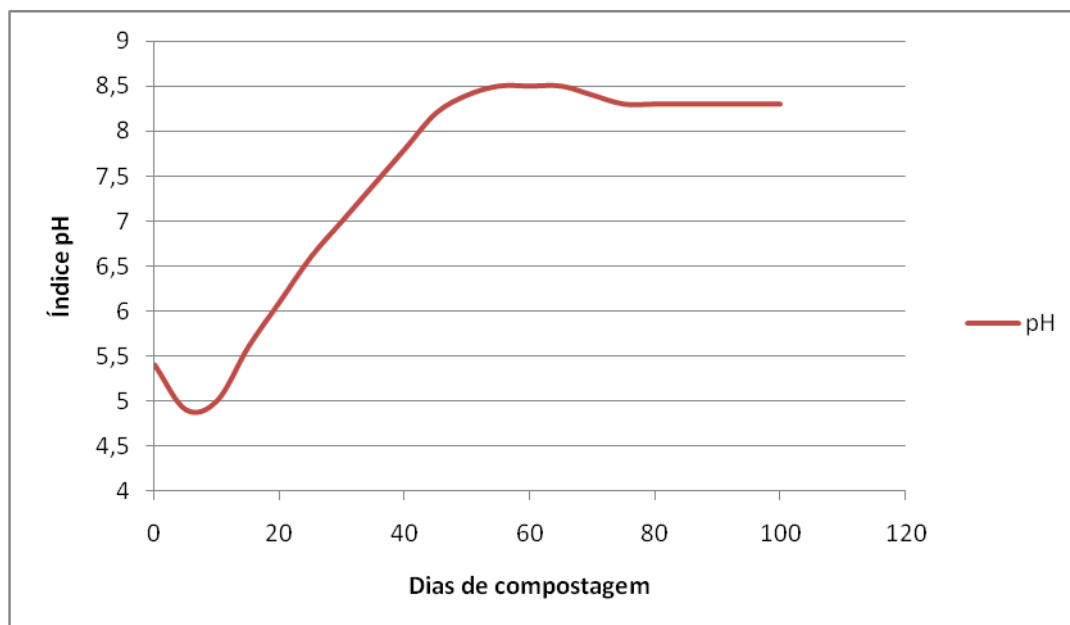


Figura 3 : Variação do pH durante a compostagem. Baseado em KIEHL (1985).

#### 4.7 - Energia biotérmica

Segundo Diver (2001), a compostagem pode ser usada como fonte de energia biotérmica. Em seu experimento as leiras foram montadas ao lado de estufas com a finalidade de aumentar a concentração de CO<sub>2</sub>, melhorando as condições da atmosfera local devido aos teores maiores deste gás, funcionando como uma câmara de calor. Este calor também foi utilizado para aquecer tubulações de água aquecendo o substrato da zona de raízes no período de inverno.

Para o aquecimento de água, Bettarello (2007), utilizou o sistema de transmissão de calor por condução, colocando dois tipos de reservatórios de água diretamente em contato com a leira de compostagem (FIG. 5). Um dos reservatórios era de metal e o outro de plástico, o primeiro apresentou maiores temperaturas mas, após 35 dias de funcionamento, devido ao contato com altas temperaturas e umidade elevada, apresentou sérios problemas de corrosão, enquanto o de plástico apresentou boa troca de calor e não foi afetado pelos agentes corrosivos durante o mesmo período de tempo.

A leira de compostagem apresentou a temperatura máxima entre o terceiro e o quarto dia estabilizando-se acima dos 50°C durante todo experimento (FIG. 4).

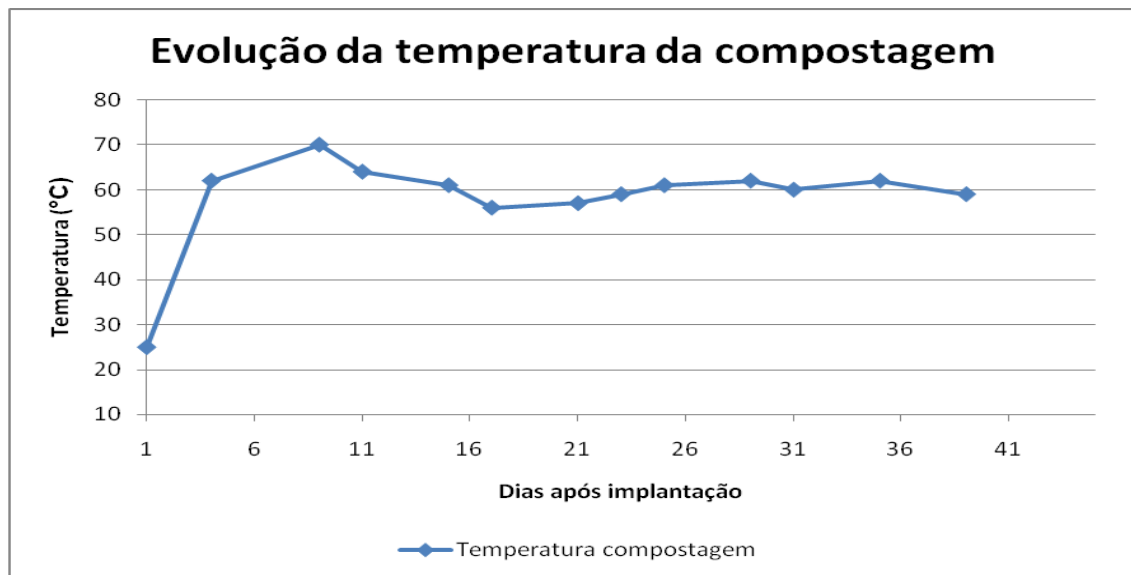


Figura 4: Evolução da temperatura da compostagem durante o experimento (BETTARELLO, 2007).

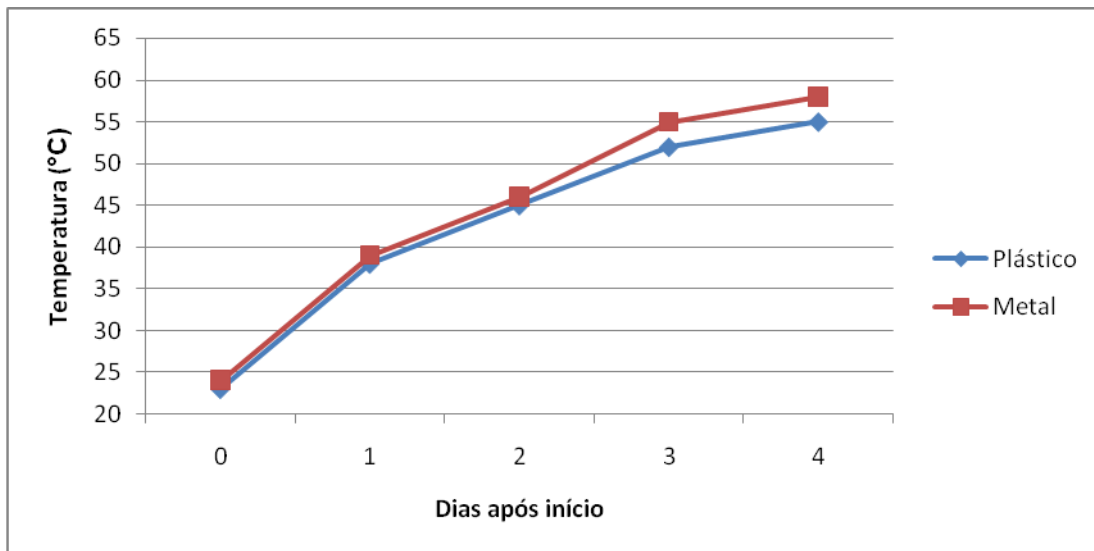


Figura 5: Elevação da temperatura da água nos reservatórios. BETTARELLO (2007).

Segundo Bettarello (2007), energia biotérmica proveniente da compostagem é considerada viável para aquecimento de água em trocadores de calor podendo ser uma boa opção para uma melhor utilização de fontes alternativas de energia reduzindo gastos com energia elétrica, fertilizantes e também o impacto ambiental gerado pelas esterqueiras.

O calor gerado pela atividade microbiana presente no processo de compostagem pode ser utilizado para aumentar a temperatura da água em reservatórios de água destinados a aquicultura. Hermes et al. (2003) obteve um aumento de cerca de 2°C na temperatura da água utilizando a energia biotérmica proveniente da compostagem de esterco. Esta energia biotérmica foi captada através de tubos de alumínio em conjunto com compressores de aquário, em 310 litros de água em uma leira de 1,2m<sup>3</sup>.

Neste trabalho, Hermes (2003), utilizou para o aquecimento de água, o sistema de reservatórios externos com trocadores calor de alumínio em contato direto com a leira de compostagem.

Tabela 1: Temperatura máxima, mínima e média da água com e sem aquecimento, do composto e do ar (HERMES, 2003).

Temperaturas	Água com aquecimento	Água sem aquecimento	Temperatura composto	Temperatura do ar
<b>T(°C) mínima</b>	21	18	30	16
<b>T(°C) máxima</b>	30	27	34	26
<b>T(°C) média</b>	25	22	31	20

O sistema proposto por Bettarello (2007), utilizando reservatórios dispostos diretamente em contato com a pilha de compostagem, proporcionou a obtenção de temperaturas muito altas tanto na leira, quanto no aquecimento da água, enquanto Hermes (2003), utilizando um sistema de aquecimento de água em reservatórios externos com trocadores de calor de alumínio em contato com a compostagem obteve temperaturas baixas no processo de decomposição da matéria orgânica e consequentemente na troca de calor entre o trocador e fonte de calor, obtendo então temperaturas baixas no sistema de aquecimento de água.

#### 4.8 - Trocadores de calor

Trocadores de calor são equipamentos utilizados para a realização de transferências térmicas entre fluidos de diferentes temperaturas. O trocador de calor mais simples é aquele que o fluido quente é misturado ao fluido frio até que as temperaturas entrem em equilíbrio cessando então a troca térmica (INCROPERA, 1998; KREITH, 1973).

Sistemas de trocadores tubulares são amplamente utilizados, pois em um pequeno volume de água, pode-se transmitir uma grande quantidade de calor, e poderem ser construídos a partir ligas metálicas resistentes a corrosão (KREITH, 1973).

A transferência de calor é estimada através da diferença de calor entre o fluido quente e o fluido mais frio, do coeficiente global de transferência de calor e da área total de superfície para a troca de calor. A temperatura final do fluido mais frio nunca pode

ser maior que a temperatura de saída do fluido mais quente em sistema de trocador em paralelo, devido a existência de gradiente de temperatura no processo (INCROPERA, 1998).

#### **4.9 - Transmissão de calor em trocadores**

A troca de energia térmica entre regiões de diferentes temperaturas pode ser definida como transmissão de calor. Esta transmissão pode ser realizada por convecção, radiação e condução (INCROPERA 1998; KREITH, 1973).

Os sistemas de transmissão de calor por condução e radiação necessitam apenas de diferenças de temperatura para acontecer, enquanto o sistema por convecção precisa, além da diferença térmica, de transporte mecânico de massa para ocorrer (INCROPERA, 1998; KREITH, 1973).

A transmissão de calor por convecção pode ser livre ou forçada, na livre apenas as diferenças de densidades entre os fluidos atuam na movimentação da massa, e no sistema forçado a movimentação é realizada por um mecanismo externo (INCROPERA, 1998; KREITH, 1973).

#### **4.10 - Transmissão de calor por convecção natural**

O fluxo de calor neste sistema ocorre necessariamente devido as diferenças de temperatura e diferenças de densidade entre fluidos. Esta diferença induz que o fluido mais denso escoe para baixo e empurre o fluido menos denso para cima (KREITH, 1973).

Geralmente quanto maior a temperatura de um líquido menor sua massa específica. Então dois fluidos com gradientes diferentes de massa específica e devido as forças dos corpos que geralmente é gravitacional proporcional a suas diferentes massas específicas, tendem a gerar um movimento de massa de forma que o líquido mais denso vá para baixo fazendo então com que o menos denso se eleve (INCROPERA, 1998; KREITH, 1973).



#### 4.11 - Bombas de calor

Bombas de calor são dispositivos termodinâmicos que através de um trabalho externo efetuam a troca de calor entre fluidos, retirando calor de uma fonte mais fria, como ar ambiente, direcionando-o na forma de energia útil para uma fonte quente (GUILHERMETTI, 2007).

As bombas de calor possuem a capacidade de retirar o calor do ar e transferir para a água, mesmo se a temperatura da água for superior a do ambiente utilizando troca de calor entre fluidos.

Uma bomba de calor por compressão é composta por, um condensador, um compressor, um evaporador e uma válvula de expansão. O condensador realiza a troca de calor entre o fluido refrigerante e o fluido aquecido, o compressor é utilizado para comprimir o vapor recebido pelo evaporador aumentando então sua temperatura e pressão, para o funcionamento do compressor é necessário um trabalho externo como energia elétrica ou combustão (FIG. 6) (SCHORR, 2007).

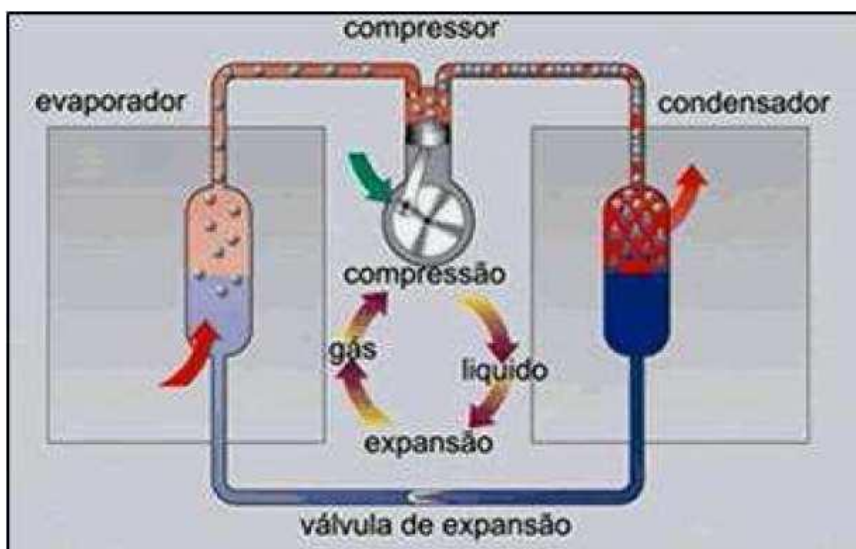


Figura 6: Ciclo de uma bomba de calor a compressão (SCHORR, 2007).

Bombas de calor podem ser utilizadas para o aquecimento e resfriamento de ambientes, aquecimento de água e para diversas instalações industriais (LOBO *et al.*, 2004).

A utilização de bombas de calor para o aquecimento de residências pode trazer uma economia de 75% no consumo de energia elétrica além de poderem ser usadas para o aquecimento de piscinas (FORTES, 2008).

Para um melhor desempenho de bombas de calor fatores como temperatura da fonte de calor e o sistema de distribuição de calor devem ser considerados (LOBO, *et al.*, 2004).

O coeficiente de performance ou COP de uma bomba de calor é obtido através da relação entre o calor fornecido pelo condensador e o trabalho aplicado pelo compressor e no ventilador, portanto quanto maior o valor do COP maior o rendimento da bomba de calor (FIG. 7).

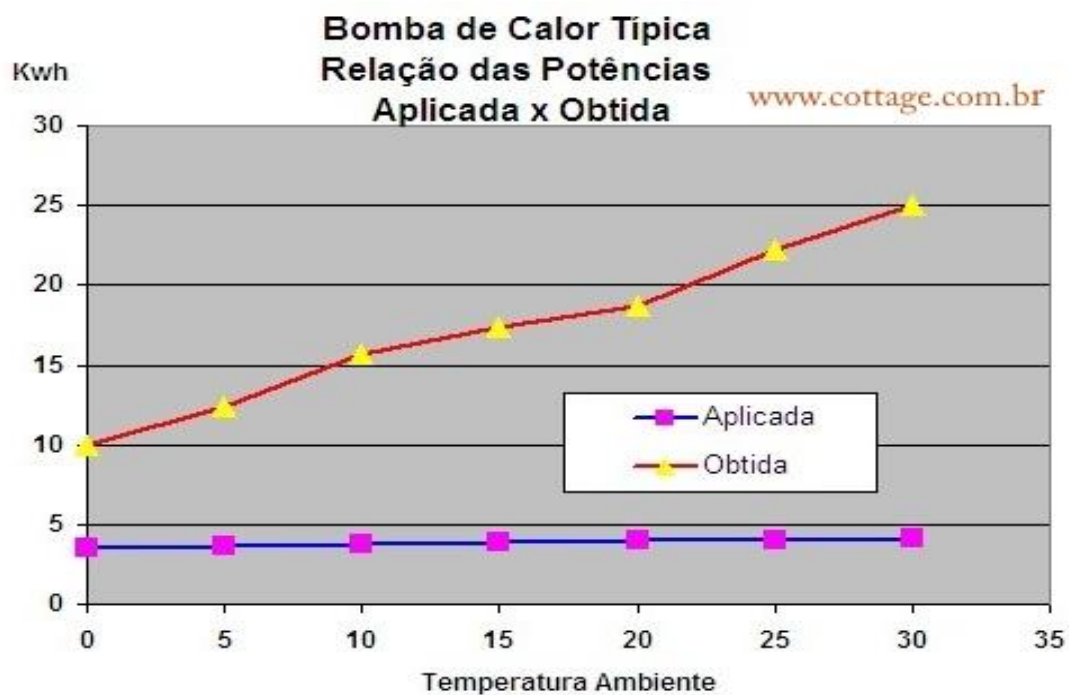


Figura 7: Relação entre potencia aplicada, obtida e temperatura ambiente (COTTAGE).

Bombeando calor para a o aquecedor a necessidade de energia elétrica para a conversão da energia elétrica em calor torna-se uma vantagem, pois aumenta sua eficiência diminuindo os gastos (LOBO *et al.*, 2004).

## **5 - Material e Métodos**

### **5.1 - Local de desenvolvimento do projeto**

O experimento foi realizado no Departamento de Engenharia Rural, no Laboratório de Biotecnologia Neolítica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina, localizado no bairro do Itacorubi no município de Florianópolis. O trabalho foi iniciado no mês de agosto e seu término no mês de novembro de 2009.

A cidade de Florianópolis, esta situada no nível do mar, sua latitude é de 27°35'48" Sul e longitude: 48°32'57" Oeste, apresenta clima Cfa com verão e inverno bem definidos, primavera e outono semelhantes e as chuvas são bem distribuídas durante todo o ano.

### **5.2 - Materiais utilizados na montagem da leira, na caixa de compostagem e nos sistemas de aquecimento de água e ar**

- Madeira de pinus para a montagem da caixa de compostagem.
- Sombrite para evitar a queda de resíduos orgânicos da caixa.
- Pregos para a montagem da caixa.
- Resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário do centro de ciências agrárias, das lanchonetes do campus da UFSC e da rede de supermercados Hippi.
- Apra de pinus contendo fezes e urina de cobaias vindas do biotério central.
- Palha de grama cortada e folhas rasteladas no campus universitário.
- Bombonas plásticas de 50 litros utilizadas para o transporte do resíduo orgânico.
- Garfo agrícola usado para a inoculação e reviramento da leira.
- Caixa pinus obtida de uma câmara de fluxo do departamento de fitotecnia.
- Cano de cobre 19,5mm para o aquecimento da água
- Cano de cobre 12,8mm para o aquecimento da água

- Cano PVC furado de 37mm para aquecimento do ar
- PVC de 20mm para instalações hidráulica
- Caixa d'água 100 litros

### 5.3 - Montagem da caixa de compostagem

A caixa de compostagem foi dimensionada com 1,46 metros de comprimento, 0,94 metros de largura e 0,70 metros de altura com volume de aproximadamente 0,9608 m<sup>3</sup>. Para melhora das condições de aeração, a caixa foi construída com espaço entre as ripas de 0,15 metros e internamente revestida com sombrite para evitar a queda dos resíduos orgânicos pelos espaços entre as ripas (FIG. 8).



Figura 8: Dimensões do módulo de compostagem

### 5.4 - Montagem da leira na caixa de compostagem

Os materiais utilizados para a montagem da leira foram, palhada recolhida do campus universitário, aparas de pinus provenientes do Biotério Central, resíduos orgânicos dos restaurantes universitários e do supermercado Hippo e inoculante adquirido do pátio de compostagem da Universidade Federal de Santa Catarina, utilizado para acelerar a atividade microbiana no início do processo de compostagem.



Na montagem da leira na caixa de compostagem foram utilizadas seis bombonas plásticas cheias de resíduos orgânicos (300 litros), cinco sacos de aparas de pinus (300 litros), duas bombonas de inoculante (100 litros) e duas bombonas de palhada (100 litros) (FIG. 9).



Figura 9: Resíduos orgânicos e inoculante utilizados na compostagem.

Ao iniciar a montagem da leira foi usada a palhada nas bordas internas da caixa para dificultar o acesso de vetores, pois inicialmente a temperatura não estará alta o suficiente para evitar a presença de larvas de moscas e outros insetos.

Na primeira camada para aumentar a aeração foi utilizado uma grande quantidade de aparas de pinus, após a camada de aparas foram colocados os resíduos orgânicos, aparas de pinus e inoculante misturados e, assim por diante formando camadas até o preenchimento da caixa. Após este procedimento a leira foi coberta com uma camada de aparas de pinus e outra de palhada, para manter a temperatura nas condições ideais e diminuir a atração de vetores (FIG. 10).



Figura 10: Montagem da leira de compostagem

### 5.5 - Manutenção e reviradas da leira de compostagem

Quando a temperatura da leira de compostagem apresentava redução significativa, de 60° para 40°C, era realizada a revirada de todo material orgânico presente na caixa, com a finalidade de aumentar a aeração, diminuir a compactação e conseqüentemente as possíveis zonas anaeróbias (FIG. 11).



Figura 11: Revirada da leira na caixa de compostagem

Regularmente para que a atividade termofílica fosse mantida foram adicionados resíduos orgânicos e cama do biotério além da revirada total da leira.

No momento das reviradas e incorporação de resíduos orgânicos os sistemas de aquecimento de água e ar eram retirados e colocados na mesma posição após o procedimento.

### 5.6 - Sistema de aquecimento de ar

Para o aquecimento do ar foram utilizados canos de cobre de 15mm de diâmetro e canos de PVC de 37mm de diâmetro. Os canos de plástico possuem furos em um dos lados e para evitar o entupimento os furos foram colocados virados para baixo (FIG. 12).

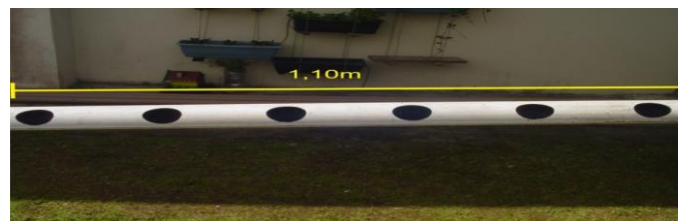


Figura 12: Cano com furos usado para no sistema de aquecimento de ar.

As tubulações foram instaladas em diferentes inclinações com a finalidade de amostrar as diferenças de temperatura e de fluxo de ar. As inclinações utilizadas foram de 0°, 10°, 20° e 25°. O comprimento dos canos utilizado foi de 1,10 metros (FIG.13).

As inclinações foram estas porque as tubulações necessariamente tinham que sair pelos espaços entre as ripas, e a máxima testada foi de 25° porque a caixa não permitia que fossem testadas inclinações superiores.



Figura 13: Pontos de entrada e saída de ar das tubulações.

### 5.7 - Sistema de aquecimento de água

O trocador de calor utilizado para o aquecimento da água foi um painel coletor de cobre com um bocal para entrada da água fria e outro orifício para a saída da água quente. As barras dispostas na horizontal são de 19,5mm de diâmetro interno e 90 cm de comprimento e as dispostas na vertical são de 12,8mm de diâmetro interno e 70 cm de comprimento (FIG.14).

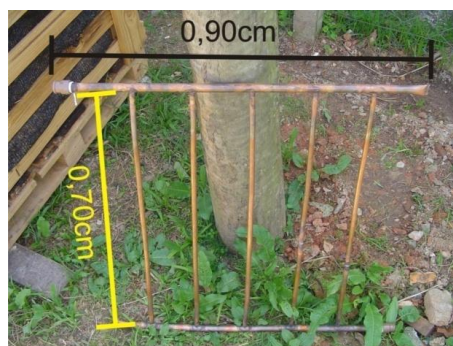


Figura 14: Trocador de calor usado para o sistema de aquecimento de água.



O trocador de calor foi desenvolvido com as quantidades de cobre adquiridas, o que inviabilizou um equipamento com uma maior área de contato que poderia proporcionar uma maior troca de calor entre a compostagem e o trocador.

Para a circulação da água foi utilizado o sistema de convecção natural, onde a água fria que é mais densa empurra a água quente e menos densa, possibilitando que a água circule sem a necessidade de nenhum tipo de força externo e mantenha a caixa d'água sempre aquecida.

O reservatório utilizado foi uma caixa d'água de plástico de 100 litros e colocada a 1,75 metros do solo, sendo que a entrada de água esta a 0,3m e a saída de água quente a 0,55m do solo (FIG. 15).



Figura 15: Posição da caixa d'água e da saída da água quente do trocador para a caixa d'água em relação ao solo e da caixa testemunha.

Para a conexão do trocador de calor com o reservatório foram necessários 4,125 metros de cano de PVC com diâmetro de 20mm, sendo que 2,47 metros para a saída de água fria da caixa d'água até o trocador e 1,655 metros para a ligar a saída de água quente do trocador até a caixa d'água e também 1,65 metros de isolante térmico para a saída de água quente. O trocador de calor tem comprimento total de 5,3 metros distribuídos em todo estrado de cobre.



Foram efetuados dois testes para o aquecimento de água, no primeiro teste o coletor de cobre foi posicionado com uma inclinação de  $31,34^\circ$  de forma que a água fria entre por baixo onde as temperaturas da compostagem são mais baixas fluindo para cima onde as temperaturas são elevadas proporcionando o efeito de convecção natural.

No segundo teste o estrado foi posicionado numa inclinação de  $12,22^\circ$  aumentando sua área de contato com as zonas mais quentes da compostagem.

### 5.8 - Coleta de dados e amostragem

A coleta dos dados de temperatura da leira foi realizada com termômetro bimetálico em 9 pontos na superfície da caixa, e em 3 pontos em cada lateral, totalizando 21 pontos de análise em toda caixa de compostagem.

Os pontos na superfície foram divididos em 3 pontos na saída de ar das tubulações, 3 pontos no centro e 3 pontos na entrada de ar. Os demais pontos coletados nas laterais eram nas alturas de 10cm, 30cm e 55cm na entrada de ar das tubulações, na saída de ar, no lado sul e no lado norte e efetuada as médias dentre as temperaturas nas mesmas alturas em todo o perímetro da caixa (FIG. 16) (FIG. 17).

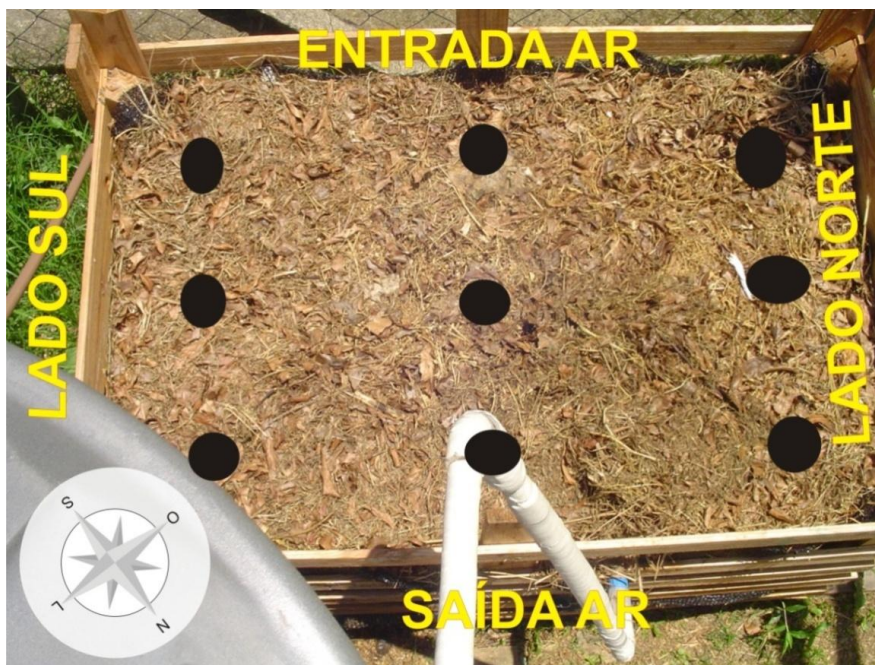


Figura 16 : Pontos de medição de temperatura na superfície do pequeno módulo de compostagem.



Figura 17: Pontos de medição de temperaturas na entrada de ar, saída de ar e laterais.

Nas tubulações a coleta de dados foi realizada com o mesmo termômetro bimetálico na entrada e na saída de ar (FIG. 18).



Figura 18: Termômetro Bimetálico utilizado para coleta das temperaturas da leira e do sistema de aquecimento de ar.

Para o cálculo da velocidade do ar nos tubos foi necessário estimar o tempo em que o ar percorria 1,10m de tubulação, este tempo foi estimado cronometrando o tempo em que a fumaça era sugada na entrada de ar até o momento da saída da fumaça na saída de ar das tubulações (FIG 19).





Figura 19: Medição da velocidade do ar através de fumaça.

Para a medição da temperatura da caixa d'água, da entrada de água quente e da saída de água fria na caixa d'água foi usado um termômetro específico para água (FIG. 20).



Figura 20: Termômetro utilizado para medição da temperatura da água.

O fluxo de água no sistema de aquecimento de água foi medido através do tempo em que a água percorre o circuito hidráulico. Foi injetado corante na região de saída da água fria então esse corante era sugado e o cronometro era acionado medindo então o tempo até o corante começar e terminar de sair na saída de água quente (FIG.21).



Figura 21: Aplicação do corante na saída da água fria até a volta na entrada da água quente.

Além da temperatura interna do pequeno módulo de compostagem, dados climáticos como precipitação pluviométrica, temperatura ambiente e intensidade de ventos também foram amostrados para a análise de interações entre estas variáveis.

Para amostragem de dados de velocidade do ar, fluxo de água no sistema e calor transportadas pelo fluxo d'água, foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$\text{Área} = \frac{\pi d^2}{4} = (\text{m}^2) \quad \text{Volume} = A (\text{m}^2) \times L (\text{m})$$

$$\text{Perímetro} = 2 \times 3,14 \times r (\text{metros}) \quad \text{Velocidade} = L (\text{m})/t (\text{segundos})$$

$$Q = V (\text{m/s}) \times A (\text{m}^2)$$

$$Q = (\rho (\text{kg/m}^3) \times Q (\text{m}^3/\text{s}) \times c (\text{kJ/kg}^\circ\text{C}) \times (t_2^\circ\text{C} - t_1^\circ\text{C}))$$

$$\rho (\text{água}) = 1000 \text{kg/m}^3 \quad \rho (\text{ar}) = 1,1614 \text{kg/m}^3$$

$$c (\text{água}) = 4,18 \text{Kjoules/kg}^\circ\text{C} \quad c (\text{ar}) = 1,007 \text{Kjoules/kg}^\circ\text{C}$$

## 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 - Temperatura do pequeno módulo de compostagem

O gráfico a seguir demonstra a evolução da temperatura da leira na caixa de compostagem, durante os 40 dias após a implantação do experimento (FIG 22).

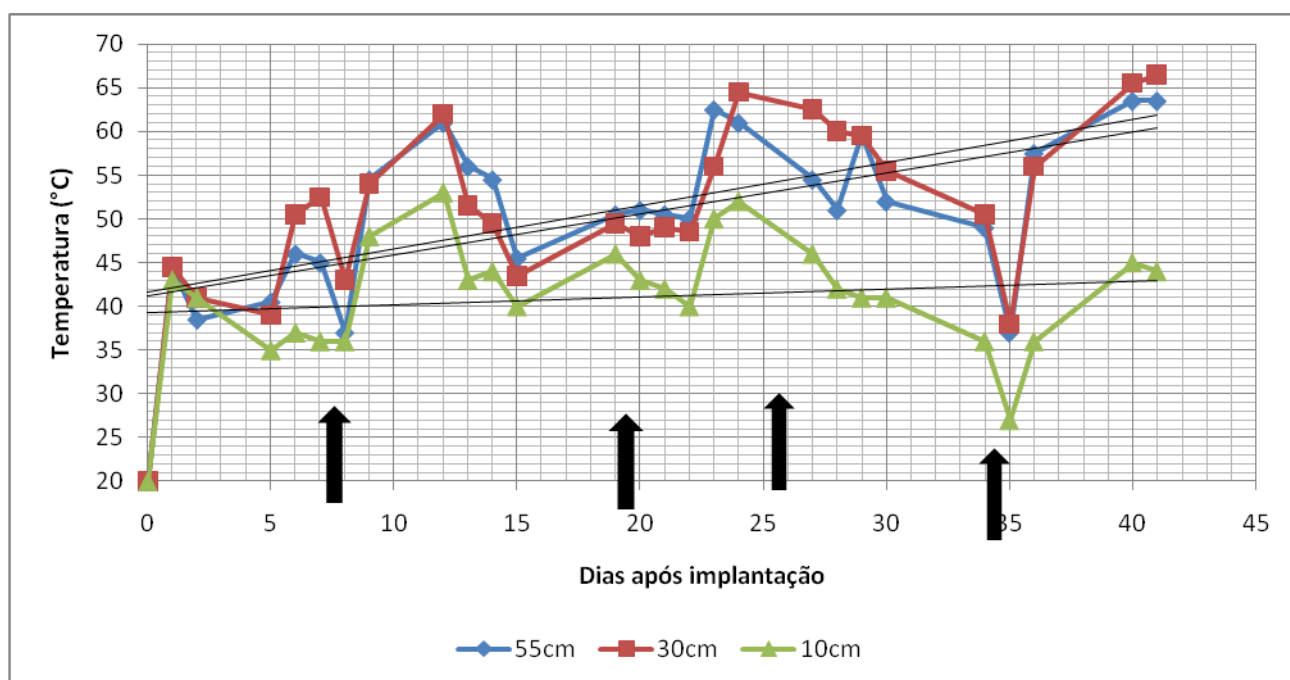


Figura 22: Temperatura da leira em diferentes alturas durante os 40 dias do experimento, setas indicam os dias das reviradas.

Durante os 40 dias de experimento a temperatura da leira a 55cm e 30cm mantiveram-se a maior parte do tempo na fase termofílica na faixa considerada ideal para a atividade biológica, principalmente após as reviradas onde as temperaturas atingiram seu ápice, enquanto nos primeiros 10cm a fase predominante foi a mesofílica com alguns picos termofílicos após as reviradas e incorporação de resíduos orgânicos.

A tabela 2 demonstra as temperaturas máxima, média e mínima, amostradas nas diferentes alturas do módulo de compostagem.

Tabela 2: Temperatura máxima, mínima e média em diferentes alturas.

Altura (cm)	T° C mínima	T° C máxima	T° C média
55	37	63,5	51
30	41	63,5	52
10	27	53	42

Como trata-se de uma leira de compostagem de pequeno volume, sua temperatura interna variou consideravelmente em função das condições climáticas.

Quando a temperatura da leira demonstrava queda significativa foram efetuadas reviradas, incorporados resíduos orgânicos e cama do biotério para melhorar as condições de umidade, aeração e disponibilidade de matéria orgânica para a manutenção da atividade termofílica.

Devido o fluxo de ar ocorrer no sentido das laterais para a superfície e o ar aquecido possuir menor densidade e o calor gerado pela atividade microbiana tende a subir explicando a maior temperatura no topo da leira do que nas regiões mais próximas ao solo (TEIXEIRA, 2009).

Portanto a dinâmica do fluxo de ar explica a diferença significativa de temperatura entre as regiões mais próximas ao topo e a próxima ao solo da pilha de compostagem.

## 6.2 - Interações climáticas com o pequeno módulo de compostagem

A figura 23 mostra a evolução da temperatura média geral da leira de compostagem em dois lados distintos, sujeitos a ação de ventos predominantes (FIG 23).

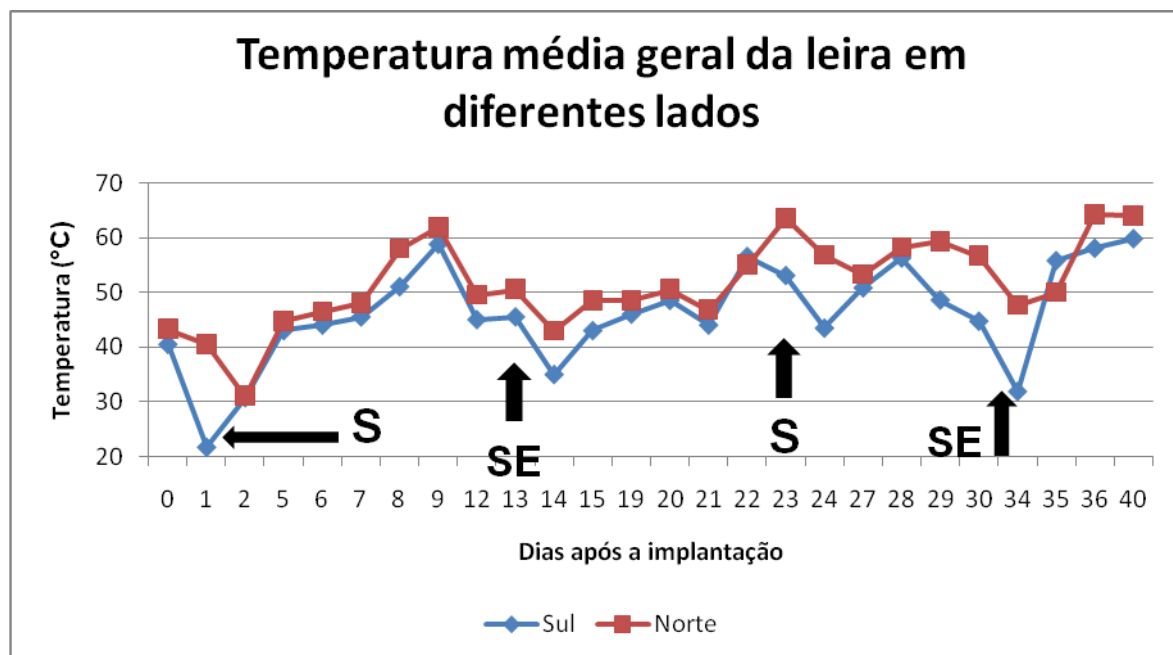


Figura 23: Variação da temperatura da leira de acordo com a ação de ventos predominantes, as setas indicam quadrantes dos ventos predominantes.

A seguir as figuras de interações entre a Intensidade de ventos, precipitação pluviométrica, Temperatura ambiente e a temperatura da composição durante o experimento, sendo que todos os dados menos os da temperatura da leira foram cedidos pela EPAGRI-CIRAN (FIG. 24).

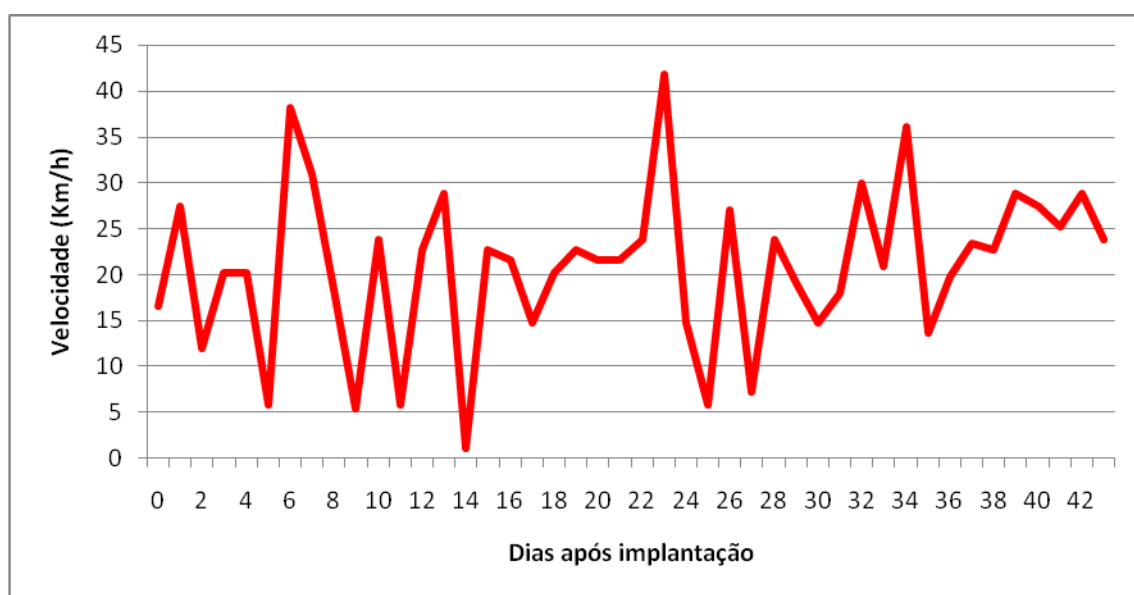


Figura 24: Intensidade do vento durante o experimento. (EPAGRI – CIRAN, 2009).

Tabela 3: Velocidade e quadrante dos ventos mais intensos ocorridos durante o experimento (EPAGRI – CIRAN, 2009).

Dias de experimento	1	6	13	23	26	32	34	39	40	42
Velocidade vento (Km/h)	27,36	38,16	28,8	41,76	27	29,88	36	28,8	25,2	28,8
Quadrante vento	S	S	SE	S	N	SE	SE	N	N	N

A seguir a figura 25 apresenta os dados de temperatura média da leira e precipitação pluviométrica durante o experimento (FIG. 25).

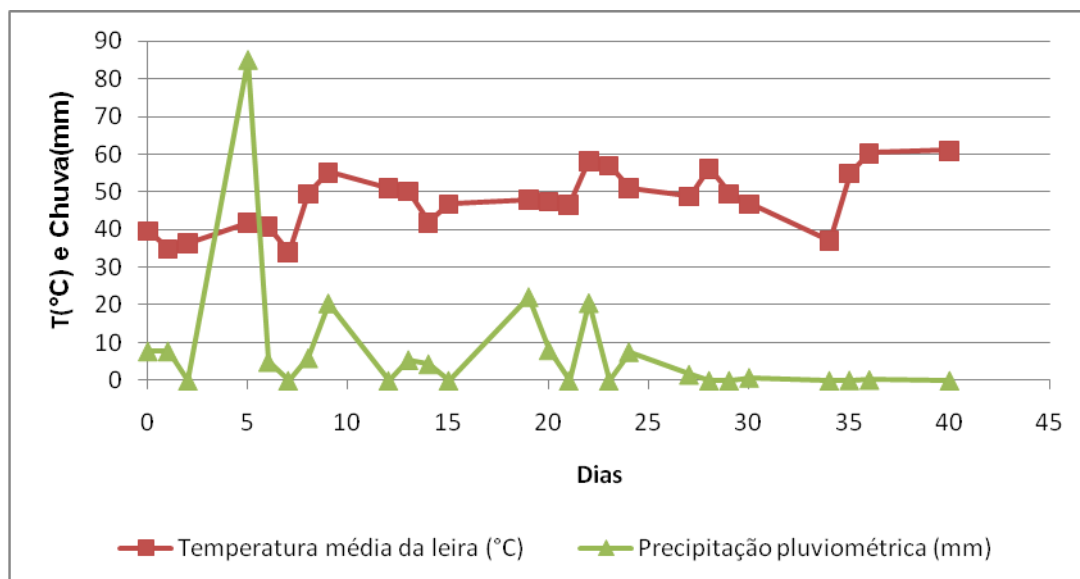


Figura 25: Evolução da temperatura média da leira de compostagem e precipitação pluviométrica durante o experimento.

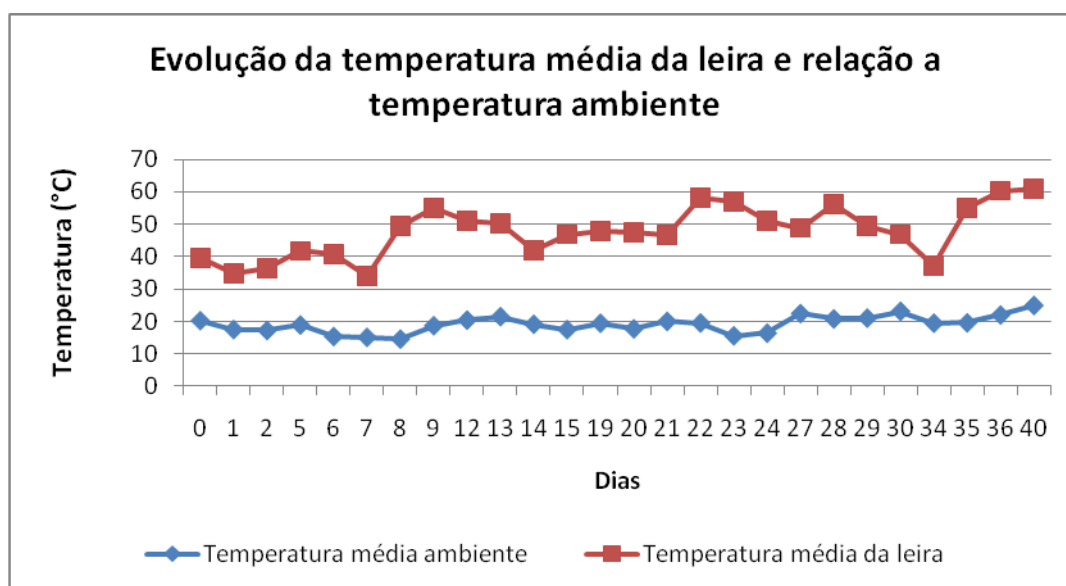


Figura 26: Evolução da temperatura média da leira e relação a temperatura ambiente

A principal forma de perda de calor da compostagem é a evaporação, sob condições de 60% de umidade relativa do ar, temperatura ambiente em torno dos 25°C, a temperatura da leira entre 50°C - 70°C e umidade relativa do ar na saída da leira de



100%, a principal forma de perda de calor pela leira é a evaporação sendo responsável por cerca de 90% do total e 10% é perdido para meio de forma direta (MILLER, 1992).

Por tratar-se de um pequeno módulo de compostagem os fenômenos climáticos interferiram em sua temperatura interna, precipitações elevadas em conjunto com ventos fortes demonstraram queda na temperatura interna da compostagem, já as temperaturas baixas aparentemente não refletiram em queda na temperatura da leira.

Ventos fortes e secos principalmente do quadrante Sul bem frequentes no período do experimento aumentaram a perda de calor por evaporação e diminuíram a umidade interna da compostagem. Segundo Howard (2007), a diminuição significativa da umidade faz com que a atividade dos microorganismos aeróbios diminua podendo até cessar.

Nos dias 1, 13, 23, e 34 após o início do experimento a temperatura interna da leira, principalmente em seu lado sul da leira demonstraram uma redução, devido aparentemente a ventos intensos e secos registrados nestes dias do Quadrante Sul.

Altos níveis de precipitação pluviométrica e ventos muito intensos do quadrante sul no dia 6 após o início do experimento aparentemente não interferiram na temperatura interna do módulo de compostagem, possivelmente porque o vento sul foi em conjunto com fortes chuvas, não causando diminuição na umidade interna da leira.

Então ventos do quadrante sul apresentaram-se prejudiciais a temperatura interna da leira de compostagem quando não estão associados a chuvas, pois o principal fator que afetou a temperatura interna do pequeno módulo de compostagem são os ventos do quadrante sul com baixa umidade relativa que retiram a umidade interna da leira prejudicando a ação dos microorganismos termófilos.

Para evitar a interferência das condições climáticas na atividade biológica, a pilha de compostagem deve possuir um bom sistema de drenagem, para suporte em caso de chuvas fortes, em caso de incidência de ventos fortes e temperaturas baixas. A utilização de quebra-ventos e uma boa cobertura podem auxiliar com que a atividade termofílica não seja interrompida (HOWARD, 2007).

Para evitar reduções drásticas na temperatura interna de um pequeno módulo de compostagem nas condições ambientais locais como ventos do quadrante sul e com

baixa umidade relativa, pode-se recomendar a utilização de uma proteção contra o vento.

Para que a temperatura do ar não influencie na temperatura interna do módulo de compostagem, a utilização de uma camada maior de palhada nas bordas e na superfície da leira poderia ter diminuído a queda da temperatura interna tornando a composteira menos susceptível a interações climáticas.

### 6.3 - Temperatura do ar nas tubulações

A Tabela 4 demonstra os dados obtidos de temperatura de saída do ar (°C) nas diferentes inclinações durante os seguintes dias após a implantação do experimento, média de temperatura nas inclinações durante a série de dados coletada e temperatura média ambiente (°C) no mesmo período da amostragem.

Tabela 4: Temperatura do ar na saída de ar das tubulações em diferentes inclinações e temperatura média ambiente.

<b>Inclinação</b>	<b>60°C</b>	<b>59°C</b>	<b>55,5°C</b>	<b>50,5°C</b>	<b>Média</b>
<b>0°</b>	38,9	28,9	34,4	26,6	32,2
<b>9,5°</b>	38,9	36,6	37,2	31,1	36
<b>19°</b>	47,2	43,9	43,3	32,2	41
<b>25°</b>	51,1	43,9	42,7	32,2	42
<b>Temperatura média ambiente (°C)</b>	20	21	23	19	20,75

As maiores temperaturas foram obtidas nas tubulações de maior inclinação, pois a área de contato entre a tubulação e a leira de compostagem se dá nas zonas mais próximas ao topo, e de maior temperatura da pilha de compostagem.

A figura 27 apresenta a temperatura do ar na saída de ar das tubulações em diferentes inclinações sob ações de diferentes temperaturas internas do módulo de compostagem (FIG 27).

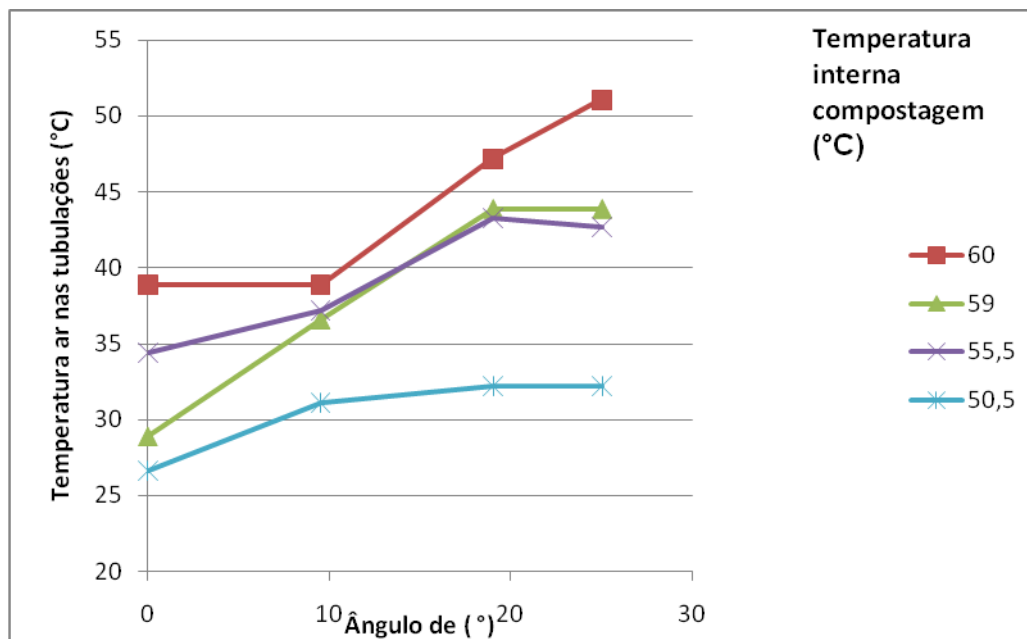


Figura 27: Perfil da temperatura do ar na saída de ar das tubulações em diferentes inclinações e em diferentes temperaturas internas da compostagem.

A temperatura do ar nas tubulações esta correlacionada com a temperatura interna do módulo de compostagem, pois quando a temperatura interna do módulo de compostagem é maior a temperatura do ar nas tubulações também é maior.

As temperaturas são diferentes pois, os testes foram realizados em dias distintos e portanto a leira de compostagem apresentava condições diferenciadas na atividade microbiana.

A temperatura da saída de ar das tubulações demonstrou-se muito superior a temperatura ambiente durante o período de análise.

#### 6.4 - Velocidade do ar nas tubulações em diferentes inclinações

A partir dos dados amostrados, foi elaborada a Tabela 4, com os seguintes dados:

- Velocidade do ar (m/s) nas tubulações em diferentes inclinações durante os seguintes dias.

Tabela 5: Velocidade do ar em diferentes inclinações.

Inclinação	60(°C)	59(°C)	55,5(°C)	50,5(°C)	37(°C)	Média
0°	0,205	0,275	0,102	0,167	0,203	0,1904
10°	0,268	0,378	0,165	0,352	0,287	0,29
20°	0,314	0,306	0,169	0,364	0,284	0,2874
25°	0,386	0,381	0,22	0,365	0,263	0,323

A média da velocidade do ar mostrou-se maior na inclinação de 25°, praticamente igual nas inclinações intermediárias e menor na menor inclinação.

Como as inclinações testadas eram adaptadas a caixa de compostagem não se pode efetuar testes em outras alturas, o que poderia proporcionar resultados ainda mais satisfatórios.

Em conjunto com as maiores temperaturas obtidas nas maiores inclinações, a velocidade de circulação do ar nas tubulações também foi superior na maior inclinação, possivelmente devido o efeito de convecção natural onde o ar frio empurra o ar quente, fazendo com em que o ar que na medida aquece ocorre o fluxo natural nas tubulações.

A figura 28 a seguir apresenta dados de velocidade do ar nas tubulações, em diferentes inclinações, sob diferentes temperaturas internas da compostagem durante o mesmo período de amostragem que o gráfico da temperatura do ar nas tubulações (FIG. 28).

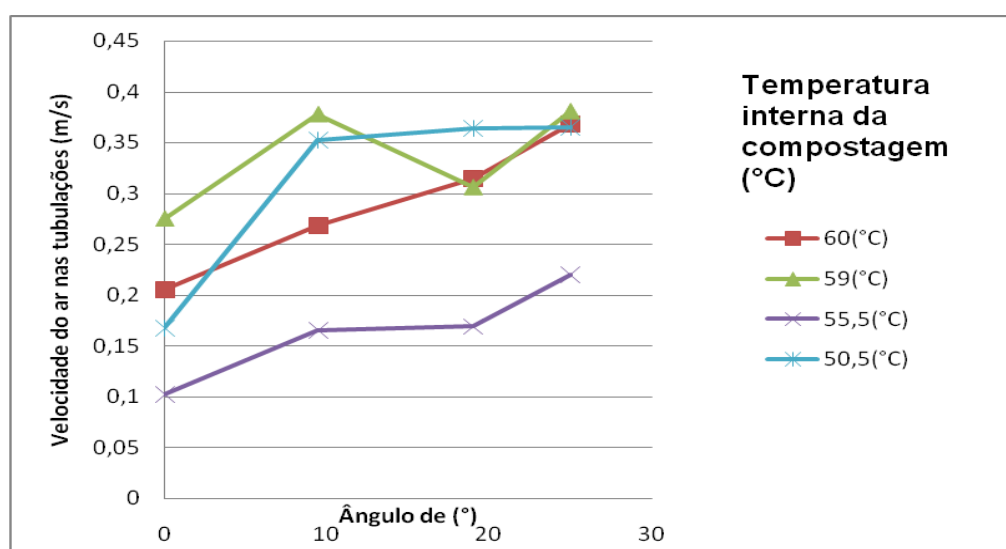


Figura 28: Perfil da velocidade do ar em diferentes inclinações.

A velocidade do fluxo de ar mostrou-se sempre superior nas tubulações com 25° de inclinação, possivelmente devido o efeito de convecção onde o ar frio empurra o ar quente que é menos denso para cima e devido a temperatura do módulo de compostagem ser maior nas zonas mais altas, ocorrendo então um maior contato entre as áreas mais quentes da leira com as tubulações de maior inclinação testadas.

O efeito de convecção é favorecido nas inclinações maiores, mas também ocorre nas menores inclinações testadas como foi possível observar.

Outros fatores a serem considerados para a obtenção de dados mais confiáveis são, a intensidade do vento no momento das medições. Para inibir um pouco a interferência de ventos na velocidade do ar poderia ser recomendado, a utilização de quebra-ventos no momento das medições e estas medições deveriam necessariamente no mesmo momento, pois uma rajada um pouco mais forte em algum momento pode interferir no resultado final do experimento.

## 6.5 - Transmissão de Calor nas tubulações em diferentes inclinações

A Tabela abaixo apresenta dados calculados de velocidade média do ar nas tubulações em diferentes inclinações, vazão média do ar nas tubulações em diferentes inclinações, temperatura de entrada e saída nas tubulações e quantidade de calor transferido pelo ar em Joules/hora e KCal/hora.

Tabela 6: Velocidade média, Vazão média e Quantidade de Calor média em diferentes inclinações.

<b>Inclinação</b>	<b>Velocidade Média (m/s)</b>	<b>Vazão média (l/s)</b>	<b>T°C entrada/saída</b>	<b>Quantidade de calor (J/h)</b>	<b>Quantidade de calor (Kcal/h)</b>
<b>0°</b>	0,1904	0,1882	22 / 33,5	9.108	2,17
<b>9,5°</b>	0,2900	0,2840	22 / 37	18.094	4,32
<b>19°</b>	0,2874	0,2866	22 / 42	23.911	5,71
<b>25°</b>	0,3230	0,3192	22 / 43,5	28.886	6,90

As tubulações com maior inclinação apresentaram maior temperatura de entrada e saída do ar, maior fluxo de ar e maior quantidade de calor do que as tubulações com inclinações inferiores.

A quantidade de calor transportado pelo ar foi superior nas maiores inclinações, o que aparentemente comprova que tubulações com inclinação de no mínimo 25° são as mais indicadas para serem acopladas em bombas de calor, pois não foram testados ângulos de tubulações maiores.

A figura 29 demonstra que quanto maior a temperatura ambiente, maiores são as potências obtidas a partir da mesma quantidade de potencia aplicada pela bomba de calor (FIG. 29).

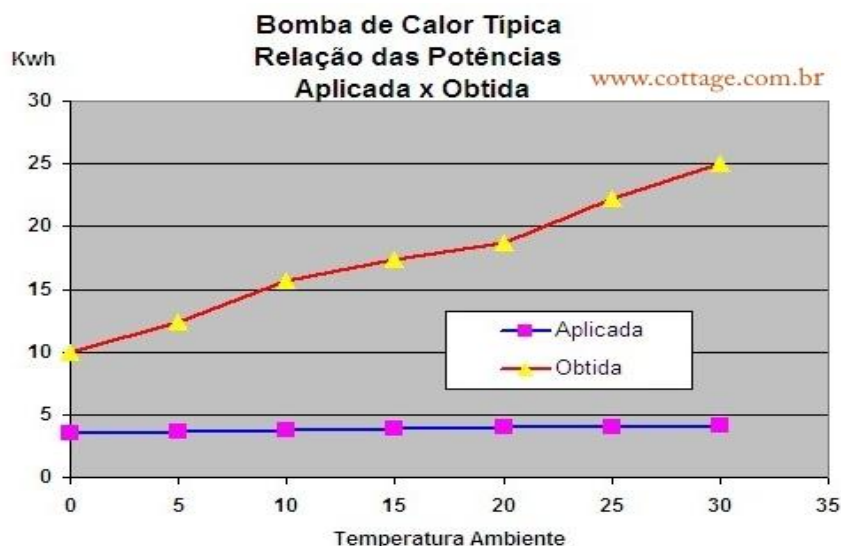


Figura 29: Relação entre potencia aplicada, obtida e temperatura ambiente (COTTAGE).

Com o aumento da temperatura ambiente de 0°C para 30°C, uma bomba de calor aumenta sua eficiência em aproximadamente 25 kw-h, sendo que na região sul o preço do quilowatthora é de aproximadamente R\$ 0,49 centavos.

Supondo que a bomba de calor fique ligada 6 horas por dia com temperatura ambiente de 10°C, a potência aplicada pela bomba é de cerca de 4 kw-h e potência obtida de 16kw-h, ou seja 12 kw-h de saldo, o que em um mês traz uma economia de 2160 kw-h, e equivale a R\$ 1058,00 reais. Caso a temperatura ambiente fornecida para

a bomba de calor seja de 30°C com a bomba ligada pelo mesmo tempo com potência aplicada de 4kw-h e potencia obtida de 25 kw-h, produzindo 21kw-h, com economia mensal de 3780kw-h, equivalente a R\$ 1852,00 reais.

Quanto mais baixa a temperatura ambiente a bomba de calor necessita de mais tempo de funcionamento para obter altas temperaturas da água, portanto fornecimento de ar quente para a bomba pode trazer além de uma maior eficiência em kwh pode diminuir o tempo de funcionamento do equipamento, aumentando ainda mais sua economia.

Portando, com as temperaturas e quantidades de calor obtidas no sistema de aquecimento de ar propostos no presente trabalho podem ser consideradas viáveis para melhorar a eficiência de bombas de calor, pois após a passagem do ar pelas tubulações houve significativa elevação das temperaturas.

## 6.6 - Aquecimento de água

Abaixo se encontram as figuras do perfil do aquecimento da água e d leira de compostagem com estrado posicionado nas inclinações de 31,34° e 12,22°, respectivamente (FIG. 30) (FIG. 31):

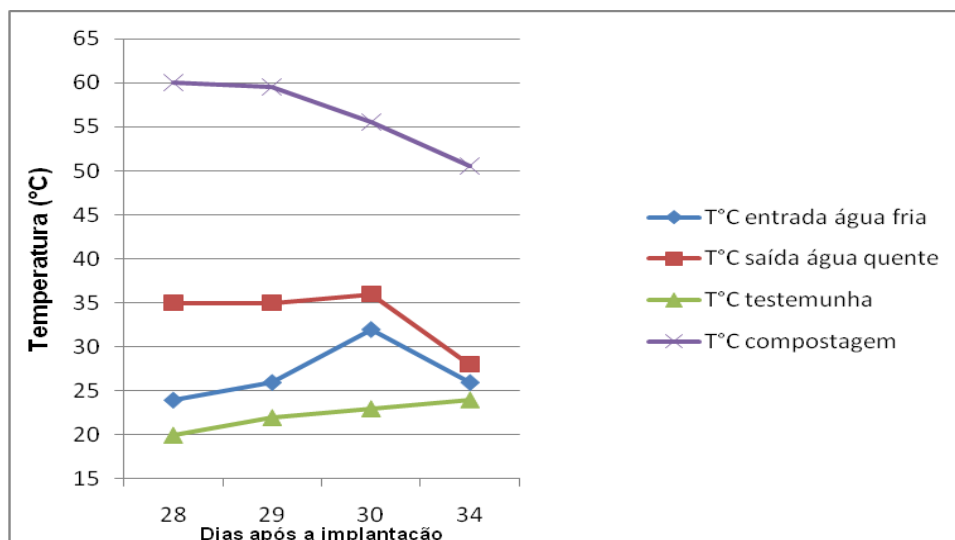


Figura 30: Temperatura da água na entrada de água fria, saída de água quente do trocador com inclinação de 31,34°, temperatura da caixa d'água testemunha e temperatura máxima da leira de compostagem.

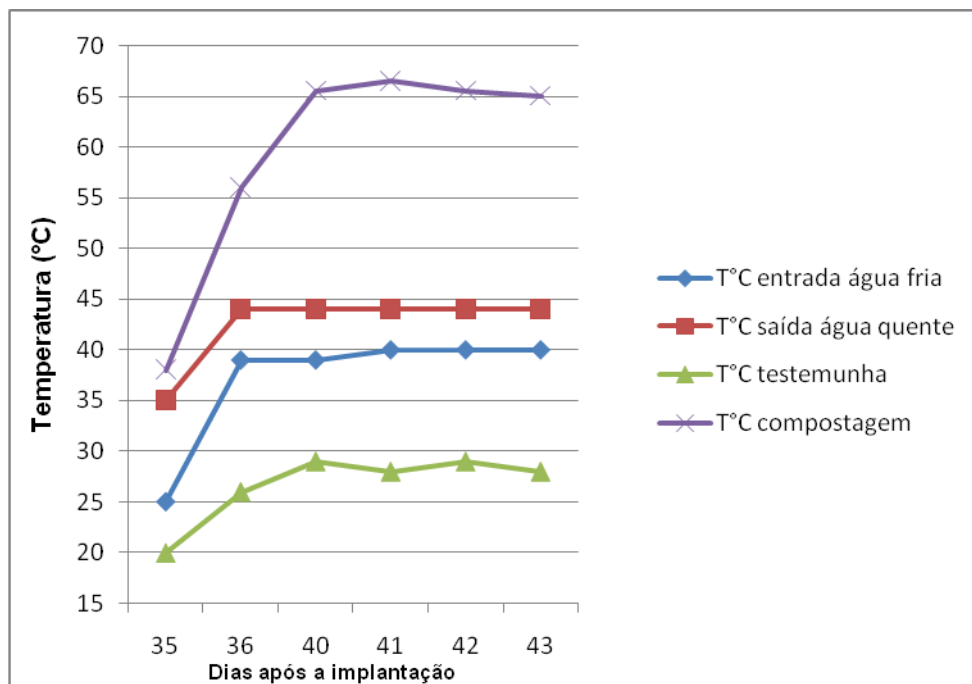


Figura 31: Temperatura da água na entrada de água fria, saída de água quente do trocador com inclinação de 12,22°, temperatura da caixa d'água testemunha e temperatura máxima da leira de compostagem.

As Tabelas abaixo apresentam dados obtidos de temperatura da saída de água fria na caixa d'água, temperatura da entrada de água quente na caixa d'água, temperatura da caixa d'água testemunha e média das temperaturas da água.

Tabela 7: Temperaturas entrada de água fria, saída da água quente no trocador de calor posicionado na inclinação de 31,34°, temperatura da caixa d'água testemunha e temperatura máxima da leira de compostagem durante o período de análise.

Estrado 31,34°	Dia 28	Dia 29	Dia 30	Dia 34	Média
T°C entrada água fria	24	26	32	26	27
T°C saída água quente	35	35	36	28	33,5
T°C testemunha	20	22	23	24	22,25
T°C compostagem	60	59,5	55,5	50,5	56,38

Tabela 8: Temperaturas de entrada de água fria, saída de água quente do trocador de calor posicionado inclinação de 12,22°, temperatura da caixa d'água testemunha e da compostagem durante o período de amostragem.



Estrado 12,22°	Dia 35	Dia 36	Dia 40	Dia 41	Dia 42	Dia 43	Média
T°C entrada água fria	25	39	39	40	40	40	37,167
T°C saída água quente	35	44	44	44	44	44	42,5
T°C testemunha	20	26	29	28	29	28	26,667
T°C compostagem	38	56	65,5	66,5	65,5	65	59,417

## 6.7 – Transmissão de calor entre a água e o trocador de calor em diferentes inclinações

A Tabela 9 demonstra os dados calculados de área do cano de PVC usado nas instalações hidráulicas e dos componentes do trocador de calor e o volume de água do cano de PVC e nos componentes do trocador.

Tabela 9: Áreas e Volumes das tubulações utilizadas para as conexões entre a caixa d'água e o trocador e dos componentes do trocador de calor.

Tubulações	Área (m²)	Volume (L)
Cano PVC 20mm	0,000314	1,29525
Cano cobre 19,5mm	0,000298	0,5364
Cano cobre 12,5mm	0,000122	0,427
Total	0,000734	2,25865

A Tabela 10 apresenta os dados de tempo médio de circulação da água desde a entrada do corante na saída de água fria até sua volta na entrada de água quente da caixa d'água nas diferentes inclinações do trocador de calor.

Inclinação Trocador	Tempo médio de circulação (segundos)
31,34°	442
12,22°	253

Tabela 10: Tempo de circulação da água desde a saída até a volta para a caixa d'água.

O menor tempo de circulação da água foi obtido no estrado com menor inclinação devido, a temperatura da compostagem, apresentar-se maior durante o período deste teste possibilitando uma maior convecção entre as diferentes densidades

da água e possivelmente por posicionar-se em contato com as zonas mais quentes da leira.

Na tabela 11, dados de quantidade de calor nas diferentes inclinações testadas para o trocador de calor em Joules/hora e Kcal/hora.

Inclinação Trocador	Quantidade de Calor média (J/h)	Quantidade de Calor média (KCal/h)
<b>31,34°</b>	2.112.730	504,6
<b>12,22°</b>	4.108.104	981,2

Tabela 11: Quantidades de calor média nas diferentes inclinações do trocador de calor, em Joules/hora e KCal/hora.

A Tabela 12 apresenta dados de velocidade média nas diferentes inclinações testadas para o trocador de calor e vazão média nas diferentes inclinações do trocador de calor.

Inclinação Trocador	Velocidade média (m/s)	Vazão média (L/h)
<b>31,34°</b>	0,00213	56,16
<b>12,22°</b>	0,03724	98,28

Tabela 12: Velocidade e Vazão nas diferentes inclinações do trocador de calor em Metros/segundos e Litros/hora, respectivamente.

Possivelmente estes resultados favoráveis ao teste com inclinação de 12,22° ocorreram devido a temperatura da compostagem apresentar-se superior durante este período de amostragem, não podendo então ser efetuada uma comparação ideal entre os dois tratamentos.

## 6.8 – Comparação entre o sistema de aquecimento de água em reservatórios internos e externos

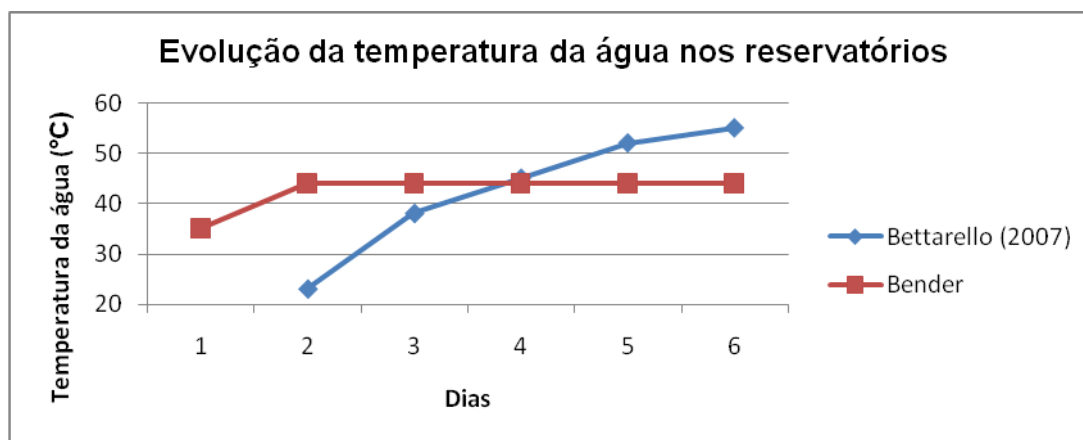


Figura 32: Evolução da temperatura da água dos reservatórios nos dois sistemas.

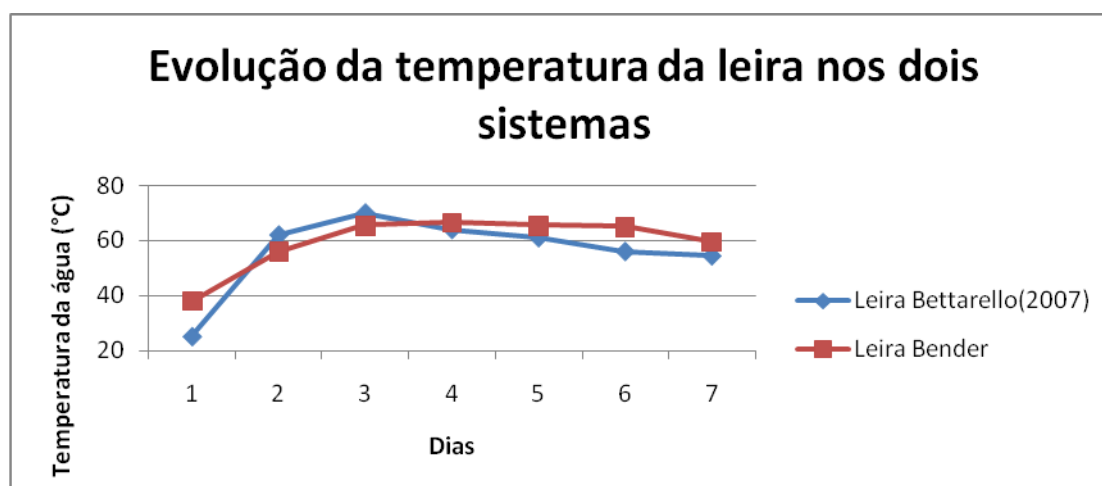


Figura 33: Evolução da temperatura da leira nos diferentes sistemas.

A tabela 13 apresenta os dados obtidos de quantidade de calor, área de contato e quantidade de calor/hora/área de contato em dois sistemas de aquecimento de água, o Bettarello (2007) apresenta o reservatório interno e este trabalho com reservatório externo

Tabela 13: Quantidade de calor trocada, Área de contato dos trocadores e Quantidade de calor por área de contato nos diferentes sistemas de aquecimento..

Sistemas de aquecimento	Quantidade máxima de calor (J/h)	Área de contato Trocador x Fonte de calor (cm <sup>2</sup> )	Quantidade calor/área de contato (J/h/cm <sup>2</sup> )	Volume reservatório (litros)
<b>Sistema Bettarello</b>	586.152,00	15.298,08	38,31	200
<b>Sistema Bender</b>	6.455.592,00	2.559,10	2.522,60	100

Segundo Bettarello (2007), utilizando trocadores de calor na forma de reservatórios internos dispostos em contato direto com a pilha de compostagem de volume de aproximadamente de 13m<sup>3</sup>, em reservatórios de plástico que são mais resistentes a corrosão a elevação da temperatura que inicialmente era de 22°C subiu 16,4°C no primeiro dia, 6,3°C no segundo, 5,7°C no terceiro e 4,5°C no quarto dia alcançando então a estabilização. O volume total de água aqueceu 0,7°C/h no primeiro dia, 0,26°C/h no segundo, 0,24°C/h no terceiro e 0,19°C/h antes de estabilizar-se.

A bombona utilizada como trocador de calor no sistema de Bettarello apresenta uma área externa de contato entre o complexo trocador de calor - fonte de calor de 15.298,08 cm<sup>2</sup>, apresentando então uma grande área de contato possibilitando uma excelente troca de calor. Para os cálculos da área de contato foram considerados apenas a área lateral da bombona, a tampa e o fundo foram desprezados.

No sistema de reservatórios externos utilizando trocador de calor de cobre posicionado na inclinação de 12,22° em contato com a leira de compostagem de volume aproximado de 0,9m<sup>3</sup>, onde a água é conduzida desde a saída até a volta da água até o mesmo reservatório, caracterizando um circuito fechado com circulação de água por convecção natural a evolução da temperatura se deu da seguinte forma:

A temperatura da água inicialmente foi de 20°C aumentando 15°C no primeiro dia e 9°C no segundo dia atingindo então a estabilização. O volume total de água aqueceu 0,41°C/h no primeiro dia e 0,375°C/h no segundo dia.

A área de contato entre o estrado de cobre usado como trocador de calor e a fonte de calor é de aproximadamente 2.559,1 cm<sup>2</sup>, o que comparado com o sistema Bettarello que esta área de contato era de 15.298,08 cm<sup>2</sup> pode ser considerada muito baixa. Mas mesmo com uma área de contato aparentemente baixa houve uma boa troca de calor, obtendo então temperaturas razoáveis no sistema de aquecimento de água.

O sistema proposto por Bettarello mostrou-se bastante viável, pois mesmo com uma baixa quantidade de calor trocado entre o trocador de calor e a fonte de calor, devido sua área de contato muito superior e o volume da leira de compostagem ser muito maior apresentou temperaturas do reservatório de água muito superiores ao proposto no trabalho.

Portanto o aquecimento de água com reservatórios internos em contato direto com a pilha de compostagem mostrou-se aparentemente mais eficiente do que o aquecimento com reservatórios externos com troca de calor efetuada por um trocador disposto no interior da leira de compostagem, devido possivelmente sua maior área de contato entre o trocador e a fonte de calor.

O principal fator que possibilitou com que o sistema de reservatórios internos fossem aparentemente mais eficientes, mesmo com o trocador de cobre usado no sistema de reservatórios externos apresentar níveis muito maiores de quantidade de calor trocados entre a leira e o coletor, as perdas de calor apresentadas neste sistema fizeram com que o sistema Bettarello(2007) apresentasse temperaturas mais elevadas no reservatório.

O fato de o trocador de calor no sistema Bettarello (2007) ser o reservatório possibilitou que a leira de compostagem, que foi construída em volta deste trocador, funcionasse como um ótimo sistema de isolamento para perdas de calor entre o reservatório e o ambiente.

No sistema de reservatórios externos proposto no presente trabalho as perdas de calor foram muito grandes após a saída de água do trocador, desde a passagem pelas tubulações até o a chegada e manutenção da temperatura interna do reservatório. Sendo então recomendado para melhores resultados que tanto o reservatório como as tubulações de água quente desde a saída do trocador de calor até a chegada no

reservatório sejam muito bem vedadas com isolantes térmicos para evitar estes altos índices de perda de calor para o ambiente.

Portanto as perdas de calor no sistema Bender, mesmo com a grande quantidade de calor trocada entre o coletor de cobre e a leira, foi o principal contribuinte para que a temperatura do reservatório não se equiparasse ou superasse as obtidas por Bettarello (2007).

O sistema com reservatórios externos poderia ser tão eficiente quanto ou ainda melhor se o trocador de calor fosse mais ramificado e longo aumentando sua superfície de troca de calor em conjunto com um sistema de isolamento térmico de qualidade do reservatório e das tubulações expostas a interferências climáticas.

Mas, como o volume da leira de compostagem e o volume do reservatório proposto por Bettarello (2007) eram muito superior ao volume da leira proposto no presente trabalho a viabilidade dos diferentes tipos de trocador de calor não podem ser comparados com precisão, devido leiras com maior volume tendem a apresentar maior temperatura e reservatórios maiores e internos possivelmente perdem menos calor para o ambiente por estarem isolados dentro da leira de compostagem.

Segundo Bettarello (2007) a temperatura ambiente não interferiu na temperatura da compostagem devido seu grande volume, não estando abaixo dos 60°C durante o experimento.

A temperatura ambiente a princípio não interferiu na temperatura da leira, mas ventos fortes do quadrante sul e precipitações pluviométricas muito intensas, aparentemente interferiram na temperatura interna da pilha, talvez por tratar-se de um pequeno módulo de compostagem com volume muito menor do que o proposto por Bettarello (2007), gerando então uma menor quantidade de calor para a troca entre o trocador e a fonte de calor, mas mesmo assim ocorreu elevação de 24°C na temperatura da água, portanto viabilizando este sistema de aquecimento.

## 7. CUSTOS DO PROJETO

Produto	Quantidade	Preço (R\$)
Cano PVC 20mm (barra 6m)	1	7,95
Flange 20mm	2	9,70
Adaptador 20mm x 1/2	2	0,80
Joelho 20mm	4	1,40
Cola	1	1,50
Curva 20mm soldável	2	2,20
Joelho 45° 20mm	1	0,50
Luva azul bucha lat. 20x1/2□	2	4,00
Adaptador curto soldável 20x1/2□	2	0,54
Tubo isolante 2m x 22mm/5mm polipropileno	2	1,56
Fita crepe para pintura 18mm x 50m	1	4,40
Cobre 15mm x 10 metros	1	70,0
<b>TOTAL</b>		<b>104,82</b>

## 8. CONCLUSÕES

Como a finalidade do trabalho foi a utilização da energia biotérmica gerada pela ação dos microorganismos decompositores da matéria orgânica, a manutenção de temperaturas elevadas durante o trabalho foi de fundamental importância para o êxito do experimento.

O pequeno módulo de compostagem mostrou-se viável para a utilização de sua energia biotérmica, pois sua temperatura interna manteve-se na fase termofílica durante a maior parte do experimento, ocorrendo redução significativa apenas em condições climáticas muito adversas, como ventos intensos e secos do quadrante sul.

Para que a temperatura ambiente não interfira tanto na temperatura interna do módulo de compostagem pode-se recomendar a utilização de quebra-ventos no caso de ventos intensos e secos como os ocorridos durante o experimento, cobertura para chuvas muito intensas e reviradas em conjunto com a incorporação de resíduos orgânicos podem fazer com que a temperatura retorne para fase termofílica.

O sistema de aquecimento de ar com tubulações com furos em um dos lados na inclinação de  $25^\circ$  aparentemente foi a mais efetiva transportando maior quantidade de calor, mostrando-se a mais viável para ser acoplada em bombas de calor com a finalidade de aumentar sua eficiência despendendo menor consumo de energia elétrica diminuindo então os gastos.

A energia biotérmica também mostrou-se eficiente para o aquecimento de água em reservatórios externos com trocadores de calor de cobre dispostos no interior da leira de compostagem.

A inclinação de  $12,22^\circ$  obteve aparentemente melhores resultados do que a de  $31,34^\circ$  para que o trocador de calor efetue trocas térmicas com melhor qualidade, apresentando maiores quantidades de calor trocadas, maiores vazões e consequentemente maiores temperaturas da água no reservatório, o que aconteceu possivelmente por a temperatura da compostagem apresentar-se maior durante o período de teste com esta inclinação não podendo então ser efetuada uma comparação efetiva



Os dois sistemas de aquecimento de água discutidos no trabalho mostraram-se viáveis para o aproveitamento da energia biotérmica da compostagem aeróbia.

O sistema com reservatórios internos utilizado por Bettarello (2007) apresenta uma grande área de contato entre o trocador e a fonte de calor e uma baixa quantidade de calor trocada, mas mesmo assim devido a leira de compostagem funcionar como um isolante térmico para o trocador/reservatório as perdas de calor para o ambiente possibilitaram que neste sistema fossem atingidas temperaturas muito altas no reservatório de água.

O sistema de aquecimento de água com reservatórios externos proposto no presente trabalho, onde o trocador de calor está em contato direto com a fonte de calor e a água circula por convecção para um reservatório externo mostrou-se também viável, pois em uma pequena área de contato entre o trocador e a fonte de calor apresentou grandes quantidades de troca de calor e um aumento significativo na temperatura da água do reservatório.

Para um melhor rendimento no sistema de aquecimento de água proposto no trabalho, seria necessário um sistema de isolamento térmico desde a saída da água quente do trocador até o reservatório para que as perdas de calor durante esse percurso e na manutenção da temperatura interna do reservatório não sejam tão influenciadas pela temperatura ambiente, isolamento este que no sistema Bettarello(2007) era realizado pela leira de compostagem que foi construída em volta do trocador/reservatório.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETTARELLO, B. **Aquecimento de água utilizando compostagem como fonte bio-térmica**, 2007.33f. Trabalho de Conclusão de Curso de Agronomia, UFSC, Florianópolis.

BID. **1i BID quer estimular novos projetos na América Latina**. Ministério das Relações Exteriores, 2006. Disponível em  
<[http://www.mre.gov.br/index.php?id=696&option=com\\_content&task=view](http://www.mre.gov.br/index.php?id=696&option=com_content&task=view)>  
Acesso em 18/09/2009

BUTTENBENDER, E. S. **Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Angelina/SC**, 2004. 140f. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis.

CUNHA, V.; CAIXETA FILHO, J. V., **Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos : Estruturação e aplicação de modelo não linear de programação de metas**. Gestão e Produção, v.9, n.2, p.143-161, ago. 2002  
Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v9n2/a04v09n2.pdf>> Acesso em 08/10/2009.

DIVER, S. **Composted Heated Greenhouses**. In *Appropriate Technology Transfer for Rural Areas*. 2001.

FERNÁNDEZ, H. T. M. Producción de biofertilizantes por degradación microbológica de resíduos orgânicos in FIGUEREDO, B. V. M. *et al.* **Microorganismos e Agrobiodiversidade : O novo desafio para a agricultura**, Editora Agro livros, 353 – 373p., 2008

FORTES, M. **Água X Eficiência energética - Qual a melhor tecnologia para os consumidores**. *Jornal O Debate / Eficiência máxima*, edição 2467, Belo Horizonte, 2008.

GIECK, K. **Manual de fórmulas técnicas**, 4 edição, Editora Hemus, 1996.

GUILHERMETTI, L. M. R. **Uso de bombas de calor em processos industriais**, 2007, Disponível em :  
<[http://www.poli.usp.br/d/pme2599/2007/Artigos/Art\\_TCC\\_012\\_2007.pdf](http://www.poli.usp.br/d/pme2599/2007/Artigos/Art_TCC_012_2007.pdf)>  
Acesso em 18/10/2009.

HERMES, C.A. et al., **Compostagem como fonte térmica para aquecimento de água na aqüicultura**. 46p. Dissertação de mestrado – Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel. 2003.

HOWARD, A. **Um testamento Agrícola**. 1ª edição, São Paulo: Editora Expressão Popular, 2007. 360p.

IBGE . **Pesquisa nacional de saneamento básico**. IBGE mapeia os serviços de saneamento básico no país, 2000.

INÁCIO, T. C. *et al*, **Coleta seletiva e compostagem de lixo orgânico um novo caminho para a reciclagem**. Revista Limpeza Pública n.40, Ed. 49 1998.

INÁCIO, C.T & Miller, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática aplicadas a gestão de resíduos**. EMBRAPA. 2009

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 4 edição, editora LTC, 1998. 650 p.

KIEHL, C.J. **Produção de composto orgânico e vermicomposto**. Informe Agropecuário, v.22, n.212, p.40-42, 47-52, Belo Horizonte, 2001.

KIEHL, J.E. **Fertilizantes orgânicos**, Editora Agronômica Ceres, São Paulo 1985.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**, editora Edgard Blucher Ltda., 510 p., São Paulo, 1973.

LOBO, J.W.; AOKI, R.A.; TEIXEIRA, D.M.; PAULILLO, G. **Determinação da Eficiência e da Aplicabilidade de Bombas de Calor em Clima Temperado Subtropical – Típico da Região Sul do País, Primeira Fase.** Espaço energia, edição 01, Curitiba, 2004.

LOUREIRO, C.D.; AQUINO, M. A. **Integrando compostagem e vermicompostagem na reciclagem de resíduos orgânicos domésticos.** Rev. Bras. Agroecologia, v.2, n.1, 4p., Seropédica, 2007.

MILLER, F. C. **Composting as a Process Based on the Control Ecologically Selective Factors** in (F. Blaine Metting, Jr. Ed.). Soil Microbial Ecology. Applications in Agricultural and Environmental Management, 1992.

MONTEIRO, P. R. H. J. Aproveitamento do lixo urbano In **Anais do II encontro brasileiro de agricultura alternativa**, 1985

NETTO, A. **Manual de Hidráulica**, 8 edição, Editora Edgard Blucher LTDA, 669p., 1998.

ODUM, P. E. **Ecologia**, Editora Guanabara, 434p. Rio de Janeiro, 1988.

SCHORR, V. E. J. **Utilização de bomba de calor em instituição filantrópica.** Curitiba: COPEL, 2007. Disponível em: <>: Acesso em 06/11/2009

SILVA, T. E. et al. **Compostagem como alternativa para o tratamento de lixo orgânico domiciliar e recuperação de áreas degradadas.** Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.22, n.210, p.77-84, 2001.

TEIXEIRA, C. **Dinâmica de gases (CO<sub>2</sub>, O e CH<sub>4</sub>) e da temperatura em compostagem estática com aeração natural no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro**, Trabalho de Conclusão do Curso de Agronomia, UFSC, Florianópolis, 2009.

## **10. ANEXOS**

**Anexo 1: Desenho esquemático do sistema hidráulico**

**Anexo 2: Folhas de cálculos**